

基于PSR与云模型的重要耕地后备资源区 水资源-能源-粮食协同安全评价

贺正齐^{1,2}, 周 到³, 张振扬¹, 费义涵¹

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 211100;
3. 河海大学经济与金融学院, 江苏 常州 213200)

摘要: 基于水资源、能源、粮食三大战略性基础资源在重要耕地后备资源区的复杂关联关系, 开展水资源-能源-粮食协同安全评价研究。以我国盐碱地这一重要耕地后备资源为研究对象, 采用PSR分析法建立典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价指标体系, 综合运用云模型、可变模糊识别模型, 构建典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价模型, 并将其应用于典型盐碱地区东营市。结果表明: 东营市水资源-能源-粮食协同安全水平呈现逐步上升的趋势, 水资源的相对短缺及其在农业生产与能源开采中的合理配置是影响三者协同安全水平的重要因素。从加强水资源的合理配置、因地制宜开展耕地后备资源区盐碱化改造两个方面, 针对性地提出了提升盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全的对策建议。

关键词: 耕地后备资源; 盐碱地区; 水资源-能源-粮食协同安全; PSR模型; 云模型

中图分类号: F326; TV213

文献标志码: A

文章编号: 1003-9511(2025)01-0026-06

Evaluation of water-energy-food synergistic security in important reserve resource for arable land regions based on PSR and cloud model//HE Zhengqi^{1,2}, ZHOU Dao³, ZHANG Zhenyang¹, FEI Yihan¹ (1. Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of World Water Valley and Water Ecological Civilization, Nanjing 211100, China; 3. School of Economics and Finance, Hohai University, Changzhou 213200, China)

Abstract: Based on the complex interrelationships among the three strategic basic resources of water, energy and food in important cultivated land reserve areas, a collaborative security evaluation study of water-energy-food was carried out in this paper. Focusing on saline-alkali land, an important cultivated land reserve resource in China, the PSR analysis method was adopted to establish a collaborative security evaluation index system for water-energy-food in typical saline-alkali region. The cloud model and variable fuzzy recognition model were comprehensively applied to construct a collaborative security evaluation model for water-energy-food in typical saline-alkali areas, and the model is applied in Dongying City, a typical saline-alkali area, as an example. The results show that the collaborative security level of water-energy-food in Dongying City shows a gradually rising trend. The relative shortage of water resources and their rational allocation in agricultural production and energy extraction are important factors affecting the collaborative security level of the three. Accordingly, countermeasures and suggestions for improving the collaborative security of water-energy-food in saline-alkali areas are put forward from two aspects: strengthening the rational allocation of water resources and carrying out saline-alkali land transformation in cultivated land reserve areas according to local conditions.

Key words: eserve resources of cultivated land; saline-alkali region; water-energy-food synergistic security; PSR model; cloud model

为了确保粮食安全, 党和国家要求坚守1.2亿hm²耕地红线, 但随着工业化、城镇化的快速推进, 用地需求日益增长, 土地资源瓶颈愈发明显, 为经济社会发展带来了极大的挑战, 亟须开展耕地

后备资源的综合开发利用。盐碱地作为我国最为重要的耕地后备资源, 一直得到党和国家的高度重视。2024年, 中央一号文件与政府工作报告都提出要加强盐碱地的综合治理。习近平总书记多次强调,

“粮食安全是‘国之大者’，耕地是粮食生产的命根子，要落实藏粮于地、藏粮于技战略，切实加强耕地保护，全力提升耕地质量，充分挖掘盐碱地综合利用潜力”。我国拥有约 1 亿 hm^2 的盐碱地资源，尽管当前的技术水平仅能开发利用约 1/3，但通过综合运用各种手段，这些盐碱地有望成为解决我国耕地资源短缺问题的关键途径。

水资源安全、能源安全、粮食安全都属于非传统安全，三者之间彼此影响，呈现出传导性和延展性的特征，任何一种安全问题都可能通过关联的传导机制，成为影响国家发展安全的重大问题，必须在综合考虑三者复杂关系的基础上建立协同发展的治理体系，从而保障水资源-能源-粮食协同安全^[1]。

随着人口的增长和经济的发展，作为人类生存和文明进步基石的土地资源面临着前所未有的压力，如何合理开发、有效利用土地资源是当今亟待解决的重大课题。①土地资源对于水资源利用至关重要。通过科学规划和技术创新，可以实现雨水的收集与利用，减少对地下水的过度开采，从而缓解水资源短缺的问题。②土地资源是粮食生产的基础。通过改良土壤、优化种植结构，可以提高粮食产量，确保粮食安全。③土地资源是新能源发展的重要载体，风能、太阳能等可再生能源的开发利用都离不开土地资源的支持。综上，应采取综合措施，加强土地资源管理，实现资源的可持续利用，为解决水资源、能源、粮食之间的矛盾与冲突提供整体性的解决方案。

盐碱地的综合利用不仅有助于增加耕地资源，提高耕地质量，还能提升农业生产效率，实现耕地资源的扩容、提质、增效。因此，本文以盐碱地为研究对象，通过研究保障盐碱地区的水资源-能源-粮食协同安全问题，更好地落实总体国家安全观，全方位夯实粮食安全基础，确保国家粮食供给的稳定和可持续性。

1 文献综述

2011 年世界经济论坛发布的《全球风险报告》首次提出水-能源-粮食风险的概念，并将其视为三大重点关注的风险之一^[2]。随后在德国波恩召开了水-能源-粮食安全纽带关系会议，第一次将水安全、能源安全和粮食安全之间的关系总结为纽带关系，提出从水-能源-粮食纽带关系可以深刻理解水资源、能源、粮食乃至气候、生物多样性等领域间的相互关系，解决全球资源面临的诸多挑战^[3-4]。此后，全球逐渐认识到合理有效利用水资源、能源、粮食三类资源安全战略问题对各个国家、区域可持续

发展的重要性^[5-6]，探索性地逐步构建了水资源-能源-粮食协同安全分析框架^[7]。例如联合国粮食及农业组织 (FAO) 从粮食安全角度提出水、能源、土地、资本以及人力资源是实现社会经济和环境目标的资源基础，运用纽带关系方法进行决策，在不破坏可持续性的前提下，解决日益凸显的资源短缺和不同用途之间相互竞争的问题，实现可持续性的自然资源利用和管理，并以此构建了水-能源-粮食安全纽带关系框架^[8-9]；Karan 等^[10]基于水资源-能源-粮食纽带关系的内涵，研究了水资源-能源-粮食纽带关系的基本特征，认为水资源、能源、粮食在生产、消耗与管理过程中相互影响、相互制约的复杂关联关系，决定了水资源-能源-粮食纽带关系具有系统性、复杂性和动态性的特征，从系统的视角形成了水资源-能源-粮食协调安全分析框架。

现有关于盐碱地区水资源安全、能源安全、粮食安全的研究大多关注于单个资源系统的安全。徐征和等^[11]深入调查并分析了黄河三角洲地区的水土资源利用现状、存在的淡水资源紧缺及盐碱地改良困难等问题，尝试提出了该地区农业水土资源高效利用的建议。杨真等^[12]认为随着传统耕地产值不断降低，人口不断增加，盐碱地的开发利用对破解我国粮食安全问题的意义逐步显现。大量国内外学者针对水资源-能源-粮食协同安全评价进行了深入研究。Cansino-Loeza 等^[13]采用多目标优化配置模型等方法，对水资源-能源-粮食协同安全状态进行了评价，并开展了相关仿真分析；鲁仕宝等^[14]从水资源-能源-粮食系统内部关系出发，利用资源冲突量化方法测算地区水资源-能源-粮食压力指数，用以反映水资源-能源-粮食协同安全水平；黄德春等^[15]以中国 30 个省级行政区为研究对象，构建了包含水资源安全、能源安全、粮食安全 3 个层次共 30 个指标在内的水资源-能源-粮食协同安全评价指标体系，并对 2003—2019 年全国 30 个省级行政区水资源-能源-粮食安全进行了测度和分析；张长征等^[16]基于水资源-能源-粮食纽带系统视角，运用 SBM-网络 DEA 方法，对黄河流域水资源-能源-粮食系统的投入产出效率进行测度，并通过 Tobit 模型分析系统效率的影响因素；盖美等^[17]结合耦合协调模型和模糊物元法，开展了我国水资源-能源-粮食支撑系统安全测度，并开展时空对比分析；何立新等^[18]将人口因素纳入水资源-能源-粮食系统，运用投影寻踪模型构建水资源-能源-粮食-人口协同安全评价模型，并以河北省为例开展实证研究。

国内外有关水资源-能源-粮食协同安全的研究多集中于促进地区或流域水资源、能源、粮食资源的

共同开发利用,使三者达到更高的协同水平。而不同的学者对于水资源-能源-粮食系统内部3种资源的重要程度认识不同。在当前和今后一个时期,由于粮食生产弱质性、周期性等特点,我国粮食安全保障在复杂多变的国内、国际新形势下面临更大的挑战与风险^[19]。水资源-能源-粮食协同安全对于确保粮食稳定供应至关重要。随着人口的增长和经济的发展,对粮食和能源的需求日益增长,农业水资源的高效利用成为保障水安全和粮食安全的根本途径。各种能源的利用方式也不断影响着粮食产量,而水资源的有限性使得三者之间的关系变得尤为紧密。近年来,我国通过一系列政策和措施,显著提高了粮食安全保障能力,但仍然面临水资源短缺、土地沙化、气候变化等诸多挑战,影响粮食安全的风险和不确定因素仍然较多,并且还在不断增多加重^[20]。2022年我国耕地总面积为1.28亿 hm^2 ,人均耕地面积0.09 hm^2 ,仅是世界人均耕地面积的27%。为应对粮食安全风险,或提高单位耕地产量,或增加耕地资源,而合理利用盐碱地可以增加粮食种植面积,因此盐碱地在保障我国粮食安全方面扮演着愈来愈重要的角色。

刘小京等^[21-22]从盐碱地土壤改良技术、资源高效利用、粮食种植模式调整等角度对我国盐碱地综合利用、保障粮食安全等方面进行了探讨,但鲜有学者对盐碱地水资源-能源-粮食协同安全展开研究。本文基于PSR分析法建立我国盐碱地水资源-能源-粮食协同安全评价指标体系,以东营市为研究对象,开展东营市水资源-能源-粮食协同安全研究,提出了保障东营市水资源-能源-粮食协同安全的针对性对策建议。

2 典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价模型构建

2.1 盐碱地区存在的主要问题

典型盐碱地区的独特地理环境和土壤特性,使得其在水资源、能源和粮食安全方面的矛盾尤为突出。这些地区水资源短缺,土壤盐碱化严重,限制了农业生产;同时,农业和能源产业的水资源需求加剧了水资源的紧张状况;此外,气候变化对盐碱地区的影响更为显著,进一步加剧了水资源、能源和粮食安全的问题。这些因素共同作用,使得典型盐碱地区的水资源-能源-粮食协同安全问题更为复杂,具体体现在两个方面。

a. 盐碱地的土壤特性对农业生产构成了显著挑战,土壤的高盐碱度导致土壤化学性质失衡,不利于作物根系的养分吸收,从而降低了土壤的肥力水

平,对粮食作物的产量造成了负面影响。为了提升盐碱地的农业生产能力,保障国家粮食安全,必须采取有效措施改善土壤环境,这通常涉及增加灌溉水量以稀释土壤中盐分的问题,因此会加剧水资源的紧张状况。而盐碱地区水资源本身匮乏,因此,在盐碱地区追求粮食安全的同时,还必须考虑水安全的保障,寻求二者之间的平衡,需要在水资源管理、灌溉技术和土壤改良措施等方面进行创新,以实现水资源的高效利用和土壤环境的可持续改善。

b. 目前“以水为纲”的盐碱地综合改良思路仍然被我国广大盐碱地区普遍采用,无论是采取物理措施、化学措施还是水利工程措施对盐碱地进行排盐、改良和培肥等处理,都需要使用机械设备、水泵、灌溉系统等能源密集型设备以及大量的水资源。我国盐碱地主要分布在华北平原、东北平原、西北内陆地区及滨海地区,这些地区均面临着水资源匮乏问题,对粮食种植等农业生产产生了严重的影响。此外,我国盐碱地与能源主产区的分布在一定程度上重合,而能源的生产亦需要大量的水资源,造成了盐碱地区农业、能源争水情况更为严重。

2.2 评价指标体系构建

基于盐碱地区水资源-能源-粮食系统的相关特性,利用PSR分析法,构建典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价指标体系。PSR分析法将需要解决的问题分为压力(P)、状态(S)、响应(R)三部分。压力指标主要关注外部对当前系统造成的压力;状态指标描述系统当前的状态;响应指标涉及人类及社会对系统变化的应对措施。从水资源安全来看,压力指标主要来源于不同用水之间的矛盾;状态指标表示当前水资源系统所面临的现实状况;响应指标主要考虑人类活动为保障水资源安全所采取的相关措施。能源安全与粮食安全相关指标的选取与水资源安全类似,最终构成典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价指标体系,如图1所示。

2.3 评价模型构建

云模型是一种将广泛存在的定性概念与其定量数值进行联系的转换模型,能够将定性概念与定量数据紧密结合,从而在处理复杂信息时发挥重要作用。云模型在资源安全评价领域应用广泛,不但能够充分融合专家经验与客观数据,展现资源安全状况,实现定性定量评价的有机结合,还能够有效处理评价过程中的模糊性和不确定性,根据不同场景和需求进行参数调整来适应多样化的评价需求。更为重要的是云模型能够将复杂的安全问题进行直观的可视化展示,动态反映资源安全状态的变化。其中,正态云模型作为最基本的形式,因其与正态分布

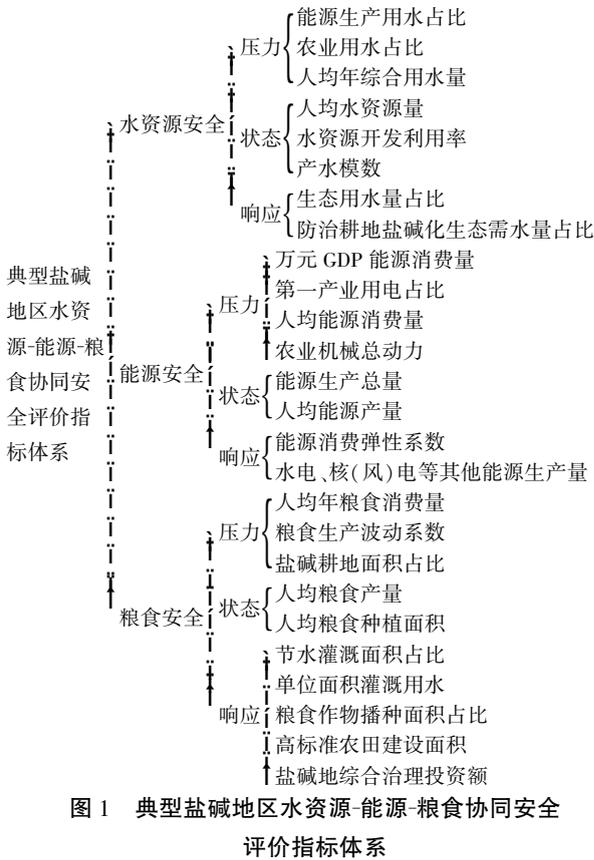


图1 典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价指标体系

的紧密关联而应用广泛,通过期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_x 3 个简单的数字特征来全面描述定性概念的定量特征,利用正向正态云发生器产生云滴,完成定性到定量的映射。

- a. 采用熵权法计算得出各指标的权重 w_i 。
- b. 采用正态云模型计算评估因素的隶属度。

正向正态云发生器是构建云模型的关键环节,它根据给定的数字特征 E_x 、 E_n 、 H_x ,生成符合特定条件的云滴集合,每个云滴都是一个包含 3 个数值特征的点, N 个云滴构成了整个云。根据选取的各指标值,利用正向云发生器,重复运行 N 次,得出最终隶属度矩阵 r_{ij} 。

进一步,采用可变模糊识别模型进行综合计算。可变模糊识别模型引入了相对隶属度和相对隶属函数的概念,使得模糊集合的定义更加明确和完整。这种改进不仅消除了传统方法中存在的主观任意性问题,而且提高了模型的灵活性和适用性。通过可变模糊识别模型,可以更准确地描述和处理现实世界中的模糊现象,为各种复杂系统的建模和分析提供强有力的工具。水资源-能源-粮食协同安全问题具有归类属性,因此将可变模糊识别模型应用于典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全测度,以科学、合理地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度、相对隶属函数:

$$h'_j = 1/[1 + (d_{jg}/d_{jb})^\alpha] \quad (1)$$

$$\text{其中 } d_{jg} = \left\{ \sum_{i=1}^n [w_i(1 - r_{ij})]^p \right\}^{1/p}$$

$$d_{jb} = \left\{ \sum_{i=1}^n [w_i(r_{ij})]^p \right\}^{1/p}$$

式中: h'_j 为样本关于等级 j 的相对隶属度; p 为距离参数,本文选用理想点模型,取 $p=2$; α 为优化准则参数,本文采用最小一乘方准则,取 $\alpha=1$ 。则典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价结果 L 为

$$L = \frac{\sum_{j=1}^m jh'_j}{\sum_{j=1}^m h'_j} \quad (2)$$

根据对相关专家访谈,将测算出的 L 分为 4 档:不安全 ($0 < L \leq 2$)、较不安全 ($2 < L \leq 3$)、较为安全 ($3 < L \leq 4$)、安全 ($L > 4$)。

3 典型盐碱地区实证研究

3.1 东营市盐碱地现状及特征

2021 年习近平总书记到山东省东营市进行考察,重点了解了黄河三角洲地区的盐碱地综合利用情况,强调“开展盐碱地综合利用,对保障国家粮食安全,端牢中国饭碗,具有重要战略意义”^[23]。东营市拥有丰富的自然资源,是我国重要的石油基地。由于地理和气候条件的影响,东营市的盐碱地分布广泛,是我国典型的盐碱地区之一。东营市积极响应习近平总书记的号召,加大了对盐碱地治理和综合利用的力度,采取改良土壤、种植耐盐植物、推广节水灌溉技术等一系列有效措施,不仅提高了当地的粮食产量,还为保障国家粮食安全作出了积极贡献。东营市盐碱地具有以下特点:

a. 东营市盐碱耕地占比大,可利用耕地面积小,水资源短缺,能源生产量大,粮食单产低。东营市盐碱地面积为 28.42 万 hm^2 ,占山东省盐碱地面积的 38%,其中,盐碱耕地 13.07 万 hm^2 ,占全市耕地总面积的 60%。2017—2022 年东营市人均水资源量(图 2(a))与同时期全国人均水资源量平均值相比差距甚大,人均水资源量极度短缺。同时,东营市是我国第二大油田——胜利油田的主产区,属于典型的能源型城市。从东营市人均能源产量(图 2(b))可以看出,东营市人均能源产量远超同期全国人均能源产量平均值(以标准煤计)。受其区位影响,东营市地下水位埋深较浅,土壤盐碱化严重,土地质量较差,粮食单产较低,从图 2(c)可以看出大多数年份粮食单产低于同时期全国水平。

b. 东营市水资源供需矛盾突出,土壤盐碱化严重威胁了粮食安全。东营市位于黄河入海口,黄河是该地区最大的淡水补给通道,但是黄河水少沙多、来水量不均衡,极易造成某些时段水资源匮乏。东

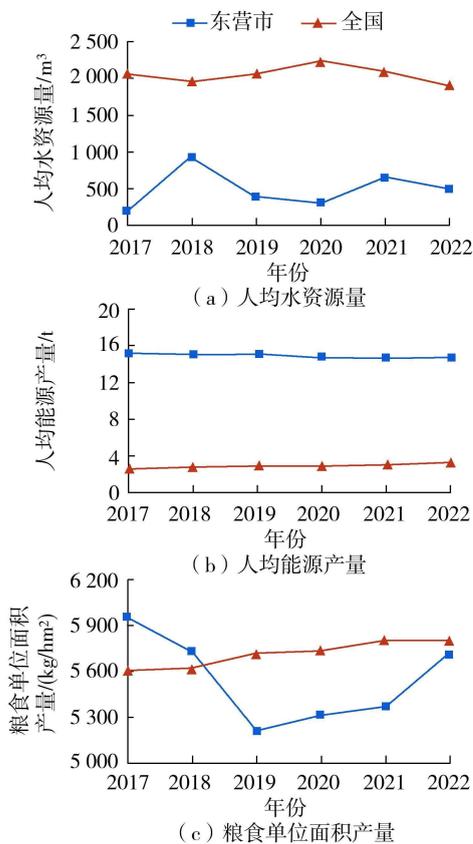


图2 2017—2021年东营市水资源-能源-粮食统计

营市人均水资源量的极度短缺严重制约了当地农业的发展,尤其对于当地的粮食种植业,水资源的短缺已成为其发展的重大瓶颈。此外,东营市的能源和工业生产同样对水资源需求巨大。胜利油田作为国内重要的油田之一,年注水量高达33亿 m^3 ,这无疑加剧了当地水资源的紧张状况。而电解铝、石油化工等高耗水行业的存在,更让东营市的水资源供需矛盾雪上加霜。而由于东营市地势低洼,加之降水时空分布不均和地表蒸发量大,土壤盐碱化现象也十分严重。土壤含盐度较高导致土壤肥力流失,使得当地土地质量较差,粮食单产较低,不仅影响了农民的收入水平,也对当地粮食安全构成了严重威胁。

3.2 东营市水资源-能源-粮食协同安全评价结果与分析

根据已构建的水资源-能源-粮食协同安全评价指标体系,搜集东营市水资源、能源、粮食以及盐碱地等方面的相关数据,使用云模型和可变模糊识别模型进行测算,得到2017—2022年东营市水资源-能源-粮食协同安全评价趋势,结果见图3。

从图3可以看出,2017—2022年,东营市的水资源-能源-粮食协同安全整体上经历了从较不安全到较安全的转变过程。①水资源安全水平。2017年处于较不安全的状态,但随着时间的推移,特别是黄河流域生态保护和高质量发展国家战略提

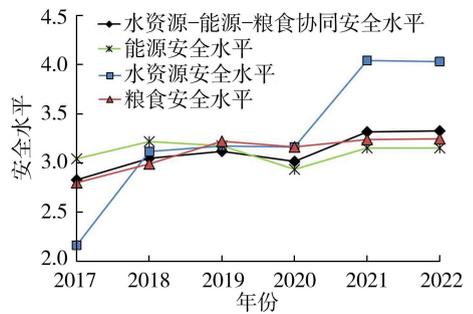


图3 东营市水资源-能源-粮食协同安全评价趋势

出后,黄河流域水资源刚性约束制度得到了更好的执行,水资源安全得到了进一步的保障,到2021年进入安全状态。②能源安全水平。2017年处于较为安全的状态,但在后续几年有所波动,其中2020年能源安全水平下降明显,进入较不安全状态。③粮食安全水平。从2017年的较不安全状态持续提升,到2019年进入较为安全的状态,这可能主要得益于政府在粮食生产、储备和调控等方面的不断努力,以及农业科技进步和农民生产技能的提升。进一步,选取研究起始时间2017年以及黄河流域生态保护和高质量发展国家战略提出后的2020年两个年度,从水资源、能源、粮食领域的各项具体指标进行分析,所有指标数据均来源于东营市相关统计年鉴,得到东营市水资源、能源、粮食相关指标变化趋势,如图4所示。

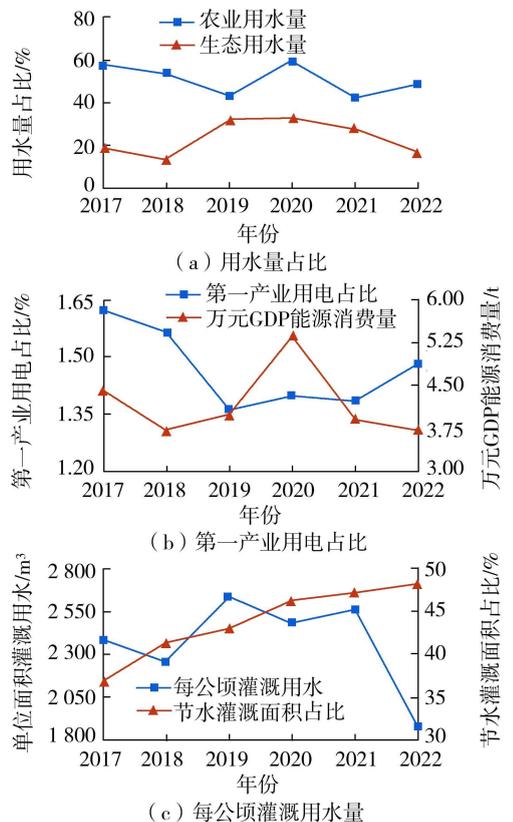


图4 东营市水资源、能源、粮食相关指标变化趋势

根据所搜集到的东营市相关数据,2017年,东营市人均水资源量远低于其他年份,可见该年度水资源相对短缺。在农业领域,农业用水占总用水量(图4(a))的比例较高,反映出农业对水资源的依赖程度较高。平均灌溉用水量较多,而节水灌溉面积占比(图4(c))较低,显示出节水灌溉技术在该年度的应用效果并不理想。在能源方面,2017年东营市的万元GDP能源消费量较高,第一产业用电占比(图4(b))较大,表明第一产业的能源消耗量较大。尽管2017年度能源产量与其他年份基本持平,显示出能源供应的相对稳定,但高耗能的产业结构可能会对能源安全和环境保护带来挑战。

在2020年,东营市水资源-能源-粮食协同安全遭遇了挑战,其中能源安全水平下降尤为显著。①水资源安全方面,人均水资源量持续低于其他年份,表明水资源短缺是长期性问题。农业需水量的增加以及农业生产用水占比的上升,反映了农业对水资源的依赖加深,这与当地农作物种植结构的调整和农业生产规模的扩大密不可分。同时,为了防治耕地盐碱化,生态用水量的投入显著增加,这不仅体现了对土地可持续利用的重视,也揭示了水资源在生态保护中的关键作用。②在能源安全方面,万元GDP能源消费量(图4(b))大幅上升,远超往年水平,这一变化与经济快速发展和工业用能需求的增长紧密相关。然而,能源生产总量却出现了下降,这主要是受到全球能源市场波动和国内能源政策调整的双重影响。供需矛盾的加剧,不仅对东营市的能源安全构成了直接挑战,也是整个社会可持续发展的严峻考验。③粮食安全方面,尽管粮食产量保持稳定,但人均粮食占有量的变化以及农业生产结构的调整暗示着粮食安全形势的复杂性。随着人口的增长和消费模式的变化,确保粮食供应的稳定性和可持续性成为东营市必须面对的重要任务。

4 结论与建议

a. 东营市水资源-能源-粮食协同安全处于中低水平。根据2017—2022年东营市的相关数据,代入构建的典型盐碱地区水资源-能源-粮食协同安全评价模型,显示东营市水资源-能源-粮食协同安全处在较不安全和低水平较为安全之间。

b. 从水资源-能源-粮食协同安全视角来看,东营市粮食安全仍面临着可利用水资源相对短缺、土壤盐碱化严重导致粮食单产较低等威胁。

c. 从东营市水资源-能源-粮食协同安全评价结果及分析来看,水资源的相对短缺以及水资源在农业生产、能源开采中的合理配置对于协同安全的变

化具有较大影响,因此应对水资源配置策略进行进一步优化,例如充分开发指标外用水、提高能源开采中的用水效率、探索高效节水灌溉技术,以确保农业用水的充足供应,通过科学合理的水资源管理,有效缓解水资源短缺的压力,为农业生产提供坚实的支撑。

d. 对于土壤盐碱化严重导致粮食单产较低的威胁,可以采取多种手段多元化开发盐碱地资源。例如针对非能源开发使用的土地,应根据其盐碱程度采取不同的综合利用措施,对于轻度盐碱地可以通过改良措施提高其农业生产潜力,对于重度盐碱地则可以考虑发展渔业、盐业等特殊用途。此外,能源安全水平的下降主要原因在于近年来全球能源市场以及国内能源政策的变化,因此一方面要结合国家在能源国际合作中的重要部署,逐步扩展东营市能源进出口渠道;另一方面,为应对双碳目标等国家能源政策的变化,东营市要加快构建多元化能源供应体系,发展新能源,加强能源储备体系建设,有效平衡可再生能源的间歇性,确保能源供应的稳定。

e. 对于全国重要的耕地后备资源区,由于资源禀赋、工业、农业基础的不同,其水资源-能源-粮食的特征以及协同安全也会不同,协同安全保障建议的侧重点也不尽一致。根据对东营市这一典型地区的研究,在政策方面,建议:一方面,要加强水资源的合理配置,这是因为我国主要的耕地后备资源区都面临着不同程度的缺水问题,影响着当地农业、能源、生活不同方面的用水调配;另一方面,要因制宜地开展耕地后备资源区盐碱化改造,综合考虑当地用水、用能以及技术、资金等情况,从而更好地对其进行综合利用,提升粮食安全保障能力。

参考文献:

- [1] 王恒,方兰. 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调关系分析[J]. 水资源保护, 2023,39(1):150-157.
- [2] 李桂君,黄道涵,李玉龙. 水-能源-粮食关联关系: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.
- [3] HOFF H. Understanding the nexus [C]//Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water Energy and Food Security Nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011:11-13.
- [4] 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.

(下转第47页)

- [14] 李刚, 唐诗雨. 淮河生态经济带产业结构优化对生态效率的影响分析[J]. 安徽农业大学学报(社会科学版), 2020, 29(4): 39-48.
- [15] 宋马林, 陶伟良, 翁世梅. 区域产业升级、政府创新支持与能源生态效率的动态关系研究: 淮河生态经济带的实证分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2021, 21(4): 119-132.
- [16] 沈晓梅, 向敏. 协同视阈下淮河生态经济带绿色高质量发展及其空间特征研究[J]. 水利经济, 2020, 38(6): 1-6.
- [17] 张勇, 高羽洁. 淮河生态经济带城市用地扩张与经济增长的脱钩关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(8): 1573-1582.
- [18] 赵茂林, 张梅菊. 淮河生态经济带能源生态效率与经济增长耦合互动研究[J]. 大连大学学报, 2022, 43(4): 80-92.
- [19] 黄敦平, 李沂泓, 孙臻瑶. 淮河生态经济带经济高质量发展水平综合评价[J]. 统计与决策, 2022, 38(1): 100-103.
- [20] WOLD S, RUHE A, WOLD H, et al. The collinearity problem in linear regression, the partial least squares (PLS) approach to generalized inverses [J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1984, 5(3): 735-740.
- [21] TONG H, LIM K S. Threshold autoregression, limit cycles and cyclical data [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1980, 42(3): 245-292.
- [22] HANSEN B E. Sample splitting and threshold estimation [J]. Econometrica, 2000, 68(3): 575-603.
- [23] HANSEN B E. Inference when a nuisance parameter is not identified under the null hypothesis [J]. Econometrica, 1996, 64(2): 413-430.
- [24] 赵培雅, 高煜, 孙雪. “双控”目标下产业智能化的节能降碳减排效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(9): 59-69.
- [25] 李婉红, 李娜. 绿色技术创新、智能化转型与制造企业环境绩效: 基于门槛效应的实证研究[J]. 管理评论, 2023, 35(11): 90-101.
- [26] TIAN H, QIN J, CHENG C. Can industrial collaborative agglomeration improve carbon emission efficiency? Empirical evidence from China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(49): 107899-107920.
- [27] 李俊奇, 王泓洁, 李惠民. 基于内容分析法的城镇雨水系统碳排放核算研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 33-43.

(收稿日期: 2023-02-23 编辑: 胡新宇)

(上接第 31 页)

- [5] 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.
- [6] 李激, 姜珊, 赵勇, 等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 39-48.
- [7] 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.
- [8] 白景锋, 张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析[J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660.
- [9] OLAWUYI D. Sustainable development and the water-energy-food nexus: legal challenges and emerging solutions [J]. Environmental Science & Policy, 2020, 103: 1-9.
- [10] KARAN E, ASADI S, MOHTAR R, et al. Towards the optimization of sustainable food-energy-water systems: a stochastic approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 662-674.
- [11] 徐征和, 傅新. 黄河三角洲农业水土资源高效利用调查与分析[J]. 山东水利, 2021, 267(2): 4-6.
- [12] 杨真, 王宝山. 中国盐碱地改良利用技术研究进展及未来趋势[J]. 水土保持, 2014, 2(1): 1-11.
- [13] CANSINO-LOEZA B, MUNGUÍA-LÓPEZ A D C, PONCE-ORTEGA J M. A water-energy-food security nexus framework based on optimal resource allocation [J]. Environmental Science & Policy, 2022, 133: 1-16.
- [14] 鲁仕宝, 尚毅梓, 王浩. 基于修正水资源压力指数的华东地区水-能-粮协同安全评估[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2): 68-77.
- [15] 黄德春, 吴小庆, 李进秋. 中国省际水资源-能源-粮食安全测度及其时空演变[J]. 水利经济, 2022, 40(3): 48-53.
- [16] 张长征, 芮晦敏. 黄河流域水资源-能源-粮食系统投入产出效率及影响因素[J]. 水利经济, 2022, 40(6): 1-7.
- [17] 盖美, 翟羽茜. 中国水资源-能源-粮食-支撑系统安全测度及协调发展[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4746-4756.
- [18] 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.
- [19] 张应良, 徐亚东. 新形势下我国粮食安全风险及其战略应对[J]. 中州学刊, 2023(3): 52-61.
- [20] 姜长云. 影响我国粮食安全的新趋势新问题[J]. 学术前沿, 2022(4): 94-100.
- [21] 刘小京, 郭凯, 封晓辉, 等. 农业高效利用盐碱地资源探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 345-353.
- [22] 高静, 许可军. 科技视角下看滨州市盐碱地综合利用现状及对策建议[J]. 农业与技术, 2022, 42(4): 36-39.
- [23] 人民网. 山东如何答好“盐碱地农业之题” [EB/OL]. [2024-11-05]. <http://sd.people.com.cn/n2/2024/1105/c166188-41031450.html>.

(收稿日期: 2024-06-07 编辑: 胡新宇)