doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.015

极端气候背景下中亚五国水-能-粮系统分析

孙　玮[1,2]　姜承希[1,2]　段伟利[3]　刘子佳[1,2]　刘文丰[1,2]

(1. 中国农业大学水利与智能工程学院, 北京 100083; 2. 农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 在气候变化与资源紧缺双重压力下,中亚地区水、能源与粮食系统间的关联性与脆弱性日益突出,协调发展与资源安全面临严峻挑战。为分析区域水-能-粮系统压力水平及其演变规律,本文以中亚五国为研究对象,基于 1995—2021 年水资源、能源与粮食相关指标数据,构建水-能源-粮食(Water - energy - food, WEF)系统压力评价体系,采用粒子群优化投影追踪模型(PSO - PEE)对区域 WEF 系统压力水平进行综合评估,系统探讨其时空演变特征及对极端气候的同期响应与滞后效应。结果表明:研究期内,中亚地区 WEF 系统压力指数整体下降,仅土库曼斯坦呈显著上升趋势(0.004/a)。系统压力具有明显空间差异,乌兹别克斯坦和土库曼斯坦整体处于较高水平,表明中亚各国资源压力分布存在明显不均衡。与正常年份相比,极端气候年份各部门及 WEF 系统压力均发生不同程度的变化,其中高温和干旱条件下变化幅度总体大于低温和高降水条件,但变化方向因国家和部门而异,且部门压力与 WEF 系统综合压力的变化并不完全一致。相关性分析表明,气温与水压力指数、能源压力指数及 WEF 系统压力指数整体呈负相关,滞后 1 年后 WEF 系统压力指数与气温相关系数增强至 -0.41,而降水与各压力指数之间相关关系因国家而异,表现出明显的空间异质性。研究结果可为中亚地区跨部门资源协同管理、气候适应策略制定及区域可持续发展目标实现提供科学依据。

关键词: 极端气候; 中亚; 水-能-粮系统; 系统压力; 可持续发展

中图分类号: F301.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0173-10　　**OSID**:

Analysis of Water - Energy - Food System in Five Central Asian Countries under Extreme Climate Conditions

Sun Wei[1,2]　Jiang Chengxi[1,2]　Duan Weili[3]　Liu Zijia[1,2]　Liu Wenfeng[1,2]

(1. *College of Water Conservancy and Intelligent Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Xinjiang Institute of Ecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *China*)

Abstract: Under the dual pressures of climate change and resource scarcity, the interconnections and vulnerabilities among water, energy, and food systems in Central Asia have become increasingly pronounced, posing severe challenges to coordinated development and resource security. To investigate the pressure levels and evolution of the regional water - energy - food system, focusing on the five Central Asian countries. Based on water, energy, and food-related indicator data from 1995 to 2021, a water - energy - food (WEF) system pressure assessment framework was developed. The particle swarm optimization-based projection pursuit evaluation (PSO - PEE) model was employed to comprehensively assess regional WEF system pressure and systematically examine its spatiotemporal evolution, concurrent responses to extreme climate conditions, and lagged effects. The results showed that the WEF system pressure index in Central Asia declined overall during the study period, with only Turkmenistan exhibiting a significant upward trend (0.004/a). The system pressure displayed pronounced spatial differences, with Uzbekistan and Turkmenistan generally experiencing higher pressure levels, indicating an uneven distribution of resource pressures among the Central Asian countries. Compared with normal years,

收稿日期: 2026-06-18　修回日期: 2026-08-12

基金项目: 中国-哈萨克斯坦伙伴研究所交流项目、国家自然科学基金项目(32361143871)和中国农业大学本科生科研训练计划项目(X2023100190616)

作者简介: 孙玮(1999—),女,博士生,主要从事农业生态水文研究,E-mail: sun_wei@cau.edu.cn

通信作者: 刘文丰(1988—),男,教授,主要从事气候变化与农业水文过程研究,E-mail: wenfeng.liu@cau.edu.cn

sectoral and overall WEF system pressures changed to varying degrees during extreme climate years. The magnitudes of these changes were generally greater under extreme high-temperature and drought conditions than that under low-temperature and high-precipitation conditions. However, the directions of change varied across countries and sectors, and changes in sectoral pressures were not entirely consistent with those in overall WEF system pressure. Correlation analysis showed that temperature was generally negatively correlated with the water stress index (WSI), energy stress index (ESI), and WEF system pressure index. After a one-year lag, the correlation between temperature and the WEF system pressure index strengthened to −0.41. In contrast, the relationships between precipitation and the pressure indices varied among countries, exhibiting pronounced spatial heterogeneity. These findings can provide a scientific basis for cross-sectoral resource management, the development of climate adaptation strategies, and the achievement of regional sustainable development goals in Central Asia.

Key words: extreme climate; Central Asia; water − energy − food system; system pressure; sustainable development

0 引言

水、能源与粮食是支撑社会经济可持续发展的关键资源[1-2]。随着人口增长与社会经济快速发展,人类对水资源、能源和粮食的需求持续增加,不同资源部门面临的压力加剧[2]。在全球变暖背景下,气候变化进一步强化了水、能源、粮食系统的脆弱性[3]:冰冻圈退化与降水时空格局变化加剧了全球水资源短缺风险;极端高温及极端降水增加了能源系统的不确定性,同时导致农业减产风险上升,进而影响区域粮食安全。因此,深入研究区域水、能源和粮食系统压力的演变特征,对理解气候变化背景下资源系统脆弱性、提升区域资源安全保障能力以及促进可持续发展具有重要意义。

近年来,随着资源约束加剧以及区域发展对自然资源依赖程度不断提升,水、能源与粮食间相互作用关系受到广泛关注。三者在资源开发、生产利用及生态环境演变过程具有相互依赖性与反馈机制[4]。水资源通过水电开发直接支撑能源生产,同时又为农业灌溉提供基础保障;农业灌溉扩张与粮食生产增长进一步增加水资源消耗,并在部分地区引发地下水超采与河流径流减少等问题[5]。这说明传统以单一资源为核心的分析框架难以刻画多部门之间复杂耦合过程及其潜在系统性风险。因此,水-能-粮(Water − energy − food, WEF)系统关联逐渐成为综合分析资源系统相互作用关系与协同管理的重要研究框架[6-8]。

极端气候事件已成为影响 WEF 系统稳定性的重要外部驱动因素。高温、干旱及异常降水等极端气候事件不仅会影响水资源供给、能源生产与粮食产出,还可能增加制冷能源需求与农业灌溉需水,从而对资源供需关系产生双重影响[9-11]。同时,水、能源与粮食部门间相互关系会进一步强化风险在不同部门间传导与累积,进而加剧 WEF 系统的不确定性与脆弱性[7,12]。尽管已有研究从资源配置及耦合关系等方面对 WEF 系统进行了广泛探讨[13-14],但针对极端气候背景下 WEF 系统压力响应及其区域差异特征的研究仍相对不足。中亚五国地处典型的干旱与半干旱气候区,位于欧亚大陆腹地,水资源时空分布不均衡,对气候变化高度敏感[15]。近年来,中亚持续增温且极端气候事件发生频率显著增加,导致冰川退缩和土壤水分下降,进而加剧区域水资源和粮食压力[16-17]。在能源方面,上游国家以水电为主,下游国家则更依赖化石能源与农业灌溉用水,使不同部门间约束关系更加复杂[13]。

本研究采用粒子群优化投影追踪模型(Projection pursuit model based on particle swarm optimization, PSO − PEE)方法构建中亚 WEF 系统压力指标体系,分析 1995—2021 年中亚五国不同部门及 WEF 系统压力的时空变化特征,并进一步探讨极端气候背景下水、能源与粮食系统压力的响应特征及区域差异,以期为中亚地区资源安全保障、气候变化适应及区域可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中亚五国(哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦)地处亚欧大陆腹地,总面积逾 4×10^6 km^2,是“丝绸之路经济带”核心区域,呈典型的“上游山地-下游平原”地形格局。该地区深受干旱-半干旱气候影响,生态环境较为脆弱,阿姆河与锡尔河作为重要的跨境河流,径流高度依赖高山冰雪融水补给[18],为农业灌溉、能源生产及居民生活提供关键水源。区域内水、能源与粮食资源存在显著的空间非对称性与季节性利用差异,吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦拥有近 90% 的径流

水源与丰富的水能资源，而下游的哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦则集中了主要灌溉农业区及石油、天然气等化石能源资源[19-20]。前苏联解体后，区域统一水资源调控机制逐渐弱化，上游国家倾向于通过冬季蓄水发电保障能源供应，而下游国家则依赖夏季来水维持农业灌溉需求，加之气候变暖背景下冰川退缩与径流波动加剧，进一步强化了跨境水资源矛盾及水-能源-粮食系统的协调压力[19,21-22]。因此，资源禀赋空间分异与利用需求不协调已成为制约中亚区域可持续发展的重要因素。

1.2　研究方法

1.2.1　水-能-粮系统压力指数构建

通过构建 WEF 综合压力指数定量评估中亚地区水-能-粮系统压力，包括水压力指数(Water stress index，WSI)、能源压力指数(Energy stress index，ESI)和粮食压力指数(Food stress index，FSI)。其中，水压力指数以淡水取用量占可利用淡水资源总量比例衡量；能源压力指数根据总初级能源生产量与消费量计算；粮食压力指数采用全球饥饿指数表征，由营养不良、儿童发育迟缓、儿童消瘦和儿童死亡率 4 个指标综合计算得到。数据来源见表 1。参照文献[23-25]和官方分类标准，将水-能-粮 3 个部门压力指标分别分为 5 个水平(表 2)。

表 1　数据来源

Tab. 1　Data sources

数据名称	数据来源	时间跨度
年均气温	https://ourworldindata.org/	1994—2021 年
年均降水量	https://ourworldindata.org/	1994—2021 年
水压力指数	https://www.fao.org/sustainable-development-goals/	1995—2021 年
总初级能源消耗和生产量	https://cn.knoema.com/	1995—2021 年
饥饿指数	https://www.globalhungerindex.org/methodology.html	1995—2021 年

表 2　中亚 WEF 系统压力分类标准

Tab. 2　Classification criteria for WEF system pressure in Central Asia　%

压力指数	压力等级				
	无压力(Ⅰ)	低压(Ⅱ)	中压(Ⅲ)	高压(Ⅳ)	超高压(Ⅴ)
WSI	0～25	25～50	50～75	75～100	>100
ESI	0～45	45～78	78～108	108～150	>150
FSI	0～4.9	5.0～9.9	10.0～19.9	20.0～29.9	>30

1.2.2　中亚 WEF 系统压力量化

采用粒子群优化投影追踪模型(PSO-PEE)构建中亚 WEF 系统压力指示器，通过搜索最优投影方向，将多维评价指标转换为一维投影值，并在保留样本分布结构特征的基础上，反映不同指标在综合评价中相对作用[13,26]。

为消除各指标量纲差异的影响，首先对原始数据进行标准化处理，构建评价指标矩阵。设原始数据矩阵为 $\boldsymbol{X}^0=[x_{ij}^0]_{n\times p}$，其中 n 为样本数，p 为指标数(取 3)，3 列依次为 WSI、ESI 和 FSI。为保证分类标准与实际评价数据具有相同尺度，将二者置于同一标准化体系。由于 3 个指标均随系统压力增加而增大，采用正向极差标准化，即

$$x_{ij}=\frac{x_{ij}^0-x_{j,\min}^0}{x_{j,\max}^0-x_{j,\min}^0} \tag{1}$$

式中　x_{ij}^0、x_{ij}——第 i 个样本、第 j 个指标标准化前后数值

$x_{j,\min}^0$、$x_{j,\max}^0$——第 j 个指标最小值和最大值

利用标准化后指标构建一维投影值。设投影方向为 $\boldsymbol{a}=(a_1,a_2,\cdots,a_p)$，则样本 i 投影值 z_i 为

$$z_i=\sum_{j=1}^{p}a_jx_{ij}\quad(i=1,2,\cdots,n) \tag{2}$$

投影方向满足

$$\sum_{j=1}^{p}a_j^2=1\quad(0\leqslant a_j\leqslant 1) \tag{3}$$

为选择最能反映样本结构特征的投影方向，综合考虑投影值的整体离散程度和局部聚集程度，构建投影指标函数 $Q(a)$ 为

$$Q(a)=S(z)D(z) \tag{4}$$

其中

$$S(z)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(z_i-\bar{z})^2}{n-1}} \tag{5}$$

$$D(z)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}(R-r_{ik})u(R-r_{ik}) \tag{6}$$

$$r_{ik}=|z_i-z_k| \tag{7}$$

式中　$S(z)$——投影值标准差

$D(z)$——投影值局部密度

$\bar{z}$——投影值平均值

r_{ik}——样本 i 与样本 k 间投影距离

R——局部密度窗口半径

$u(\cdot)$——单位阶跃函数

由于 $Q(a)$ 随投影方向呈非线性变化，以 $Q(a)$ 最大化为优化目标，采用 PSO 从候选方向中搜索最优投影方向 $\boldsymbol{a}^*$，并将 $\boldsymbol{a}^*$ 代入式(2)，计算各样本 WEF 系统综合压力投影值 z_i。

模型计算包括分类标准数据优化和实际数据优化 2 个过程。首先，将 WEF 系统压力分类标准数据输入 PSO-PEE 模型，获得分类标准数据最优投影方向，并计算各等级标准边界投影值，据此确定Ⅰ～

Ⅴ级压力区间。其次,对 1995—2021 年中亚五国数据进行优化,获得最优投影方向及各国样本综合投影值,并依据上述压力区间确定相应压力等级。由于 WSI、FSI 和 ESI 均采用正向标准化,投影值越大,表示 WEF 系统承受的综合压力越大。

1.2.3 数据统计分析

采用 Theil－Sen 斜率估计与 Mann－Kendall 趋势检验方法,分析 1994—2021 年中亚五国气温和降水量的年际变化趋势。采用 Pearson 相关系数分析气温、降水量与水、能源、粮食压力指数及 WEF 系统综合压力指数间同期及滞后 1 年的相关关系,以揭示气候变化与 WEF 系统压力间响应关系。相关系数显著性采用双侧 t 检验,显著性水平设定为 * 表示 $p<0.05$、** 表示 $0.05\leqslant p<0.01$。

中亚地区极端气候年份采用分位数法进行识别。分位数法是一种常用的统计分析方法,用于描述数据在排序后的相对位置。采用 80% 和 20% 分位数作为阈值,对 1995—2021 年中亚五国年降水量和年均气温进行极端气候年份识别。当某一年份气温或降水量大于等于 80% 分位数时,定义为高值极端气候年份;当小于等于 20% 分位数时,定义为低值极端气候年份。由此,将研究期内超过或低于阈值的年份分别识别为极端气候年份。

2 结果与分析

2.1 PSO－PEE 模型训练结果

如图 1a 所示,分类标准数据集最优目标函数值为 0.115 9,优化过程在约 13 次迭代后趋于稳定。目标函数最佳投影方向为 $\boldsymbol{a}^*$ = (0.485 8, 0.622 6, 0.613 4),根据投影值分布,可将 WEF 系统压力等级划分为:Ⅰ级(0 ~ 0.293)、Ⅱ级(0.293 ~ 0.548)、Ⅲ级(0.548 ~ 0.870)、Ⅳ级(0.870 ~ 1.231)和Ⅴ级(> 1.231)。投影值越大,表明 WEF 系统压力越大。

评价指标数据集目标函数值在约 10 次迭代后趋于稳定(图 1b),模型表现出较快的收敛速度。最优目标函数值为 9.46,目标函数最佳投影方向为

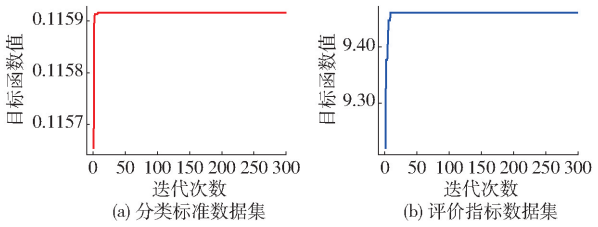


图 1 数据集优化过程

Fig. 1 Dataset optimization process

$\boldsymbol{a}^*$ = (0.979 4, 0.201 9, 0.002 6),计算得到的 1995—2021 年各国投影值可作为 WEF 系统压力水平指标。根据最佳投影方向值可知,WSI 在 WEF 系统压力中权重最大,与以往研究结果一致[13,17,27],表明模型优化结果具有较好合理性。投影系数主要反映评价样本最优投影方向,不直接作为指标重要性排序依据。

2.2 中亚五国水-能-粮系统压力变化特征

2.2.1 部门压力变化特征

1995—2021 年,中亚五国不同部门压力整体表现为显著下降趋势(图 2),各国 FSI 均有所下降(图 2c),其中乌兹别克斯坦 FSI 下降最显著。哈萨克斯坦(Kazakhstan, KAZ)、吉尔吉斯斯坦(Kyrgyzstan, KGZ)、乌兹别克斯坦(Uzbekistan, UZB)WSI、ESI 均下降,吉尔吉斯斯坦 WSI 和 ESI 下降幅度最大。然而,土库曼斯坦(Turkmenistan, TKM)与乌兹别克斯坦水资源长期处于超高压状态,且土库曼斯坦 WSI 和 ESI 呈增加态势;塔吉克斯坦(Tajikistan, TJK) FSI 在高压和超高压之间波动,且 ESI 有所上升。

2.2.2 WEF 系统压力变化特征

1995—2021 年,中亚各国 WEF 系统压力指数存在显著差异(表 3、图 3a)。其中,土库曼斯坦 WEF 系统压力呈显著上升趋势(0.004/a),吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦呈显著下降趋势,哈萨克斯坦 WEF 系统压力下降趋势不显著。尽管中亚 WEF 系统压力整体有所下降(图 3a),但仅哈萨克斯坦为Ⅰ级无压力,乌兹别克斯坦和土库曼斯坦则处于超高压力(图 3b)。

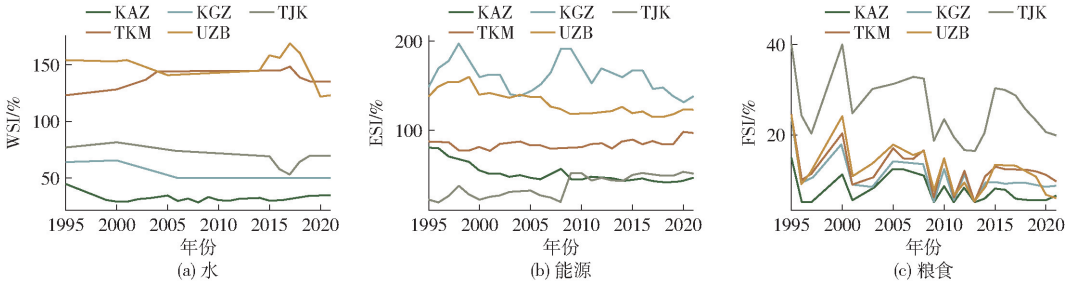


图 2 1995—2021 年中亚地区 WSI、ESI、FSI 指数时间变化曲线

Fig. 2 Temporal variations in WSI, ESI, and FSI in Central Asia from 1995 to 2021

表 3　1995—2021 年中亚地区 WEF 系统压力指数

Tab. 3　WEF system pressure index in Central Asia from 1995 to 2021

国家	1995 年	1996 年	1997 年	2000 年	2001 年	2003 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2020 年	2021 年
KAZ	0.34	0.32	0.29	0.23	0.22	0.24	0.25	0.22	0.24	0.23	0.24	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.23	0.23	0.24	0.25
KGZ	0.53	0.55	0.56	0.55	0.54	0.48	0.46	0.45	0.46	0.49	0.49	0.47	0.45	0.47	0.46	0.46	0.47	0.47	0.45	0.45	0.43	0.44
TJK	0.47	0.47	0.48	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.47	0.47	0.46	0.46	0.45	0.45	0.45	0.39	0.36	0.43	0.46	0.46
TKM	0.81	0.81	0.82	0.83	0.84	0.89	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.93	0.92	0.93	0.93	0.93	0.96	0.89	0.89	0.89
UZB	1.04	1.05	1.05	1.04	1.04	1.00	0.96	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	1.04	1.04	1.10	1.05	0.84	0.84

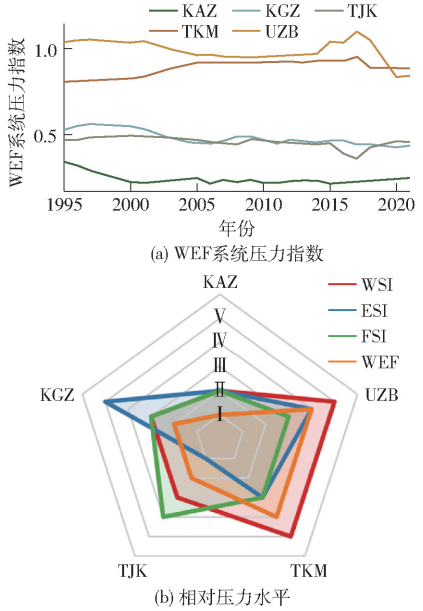


图 3　1995—2021 年中亚地区 WEF 系统压力指数变化及相对压力水平

Fig. 3　Changes in WEF system pressure index and relative pressure levels in Central Asia from 1995 to 2021

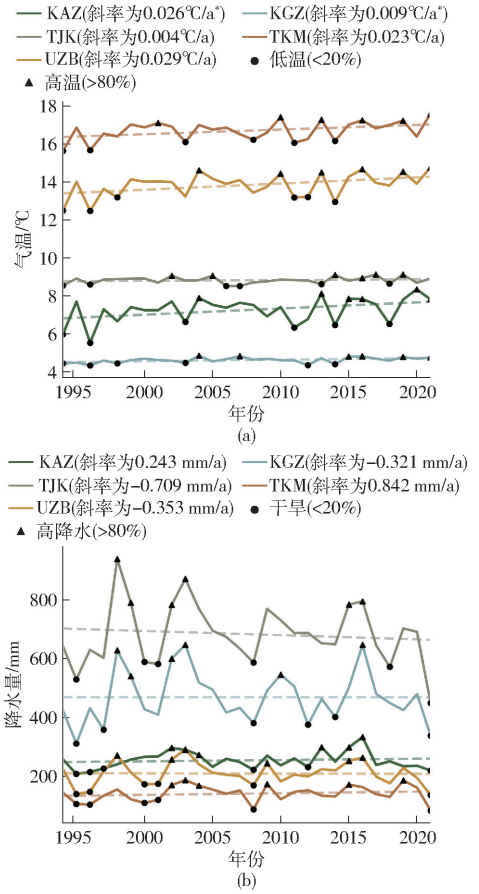


图 4　1994—2021 年中亚地区气温、降水量时间变化曲线

Fig. 4　Temporal variations in temperature and precipitation in Central Asia from 1994 to 2021

2.3　中亚五国极端气候识别与压力响应特征

2.3.1　极端气候年份识别

中亚地区气候条件具有显著空间异质性，土库曼斯坦多年气温均值最高，塔吉克斯坦多年降水量均值最高（图 4）。1994—2021 年，中亚五国年均气温整体呈缓慢上升趋势（图 4a），其中哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦增温趋势最为显著（$p<0.05$）。年均降水量方面，不同国家降水量变化范围为 85 ~ 939 mm，哈萨克斯坦和土库曼斯坦总体呈增加趋势，而乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦表现为下降趋势（图 4b）。此外，中亚五国极端气候事件出现年份较为一致，高温或低降水年份往往集中出现在相近时期。

2.3.2　极端气候年份下压力响应特征

中亚五国不同部门压力对极端气候的敏感性存在明显差异（图 5）。从极端年份与非极端年份均值差异来看，高温和干旱条件下各压力指标偏离幅度总体较大，但变化方向因国家和部门而异。

在极端高温年份，除土库曼斯坦 WSI 增加（1.69%）以及塔吉克斯坦 ESI 和 FSI 增长（分别为 6.46% 和 0.79%）外，其余各国 WSI、ESI 和 FSI 均呈下降趋势（图 5a）。此外，仅土库曼斯坦 WEF 综合压力指数略有增加（0.005 9），而塔吉克斯坦（-0.047 2）和乌兹别克斯坦（-0.047 0）降幅最大，表明高温在系统全局层面增加了资源统筹的复杂性。

低温对系统压力的影响具有部门倾向性（图 5b）。WSI 和 ESI 呈明显增长，仅塔吉克斯坦表现为压力下降。粮食维度则在低温下表现出普遍的压力缓解，除吉尔吉斯斯坦压力增长 2.34% 外，其余各国均表现为负值，尤其是乌兹别克斯坦下降

3.92%。总体而言,低温环境对 WEF 系统压力的影响相对平缓,离散程度相对较低。

高降水年份并未呈一致性的压力消减特征,反而引发 WSI 与 ESI 增加(图 5c)。除哈萨克斯坦为负值外,其余 4 个国家均表现为压力增加,其中乌兹别克斯坦 WSI 增长 5.34%,吉尔吉斯斯坦 ESI 增幅达 11.46%。说明在高降水年份,这些国家在水资源管理和能源系统稳定性方面面临比正常年份更大的挑战。在粮食维度,高降水确实起到了缓解作用,仅表现为塔吉克斯坦压力增加。WEF 系统压力则呈两极分化,哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦 WEF 系统压力降低,而土库曼斯坦和乌兹别克斯坦系统压力增加。

干旱年份导致中亚五国不同部门压力的剧烈波动(图 5d)。在粮食维度,中亚五国压力均显著增加,塔吉克斯坦增幅达到 5.98%。WSI 和 ESI 则在不同国家对比明显:哈萨克斯坦 WSI 增加 4.66%,而土库曼斯坦压力下降 8.98%;哈萨克斯坦 ESI 增幅高达 15.11%,而塔吉克斯坦下降 7.50%。从 WEF 系统压力来看,各国反馈也截然不同,土库曼斯坦降幅高达 0.064 2,而哈萨克斯坦 WEF 系统压力增加 0.046 7。

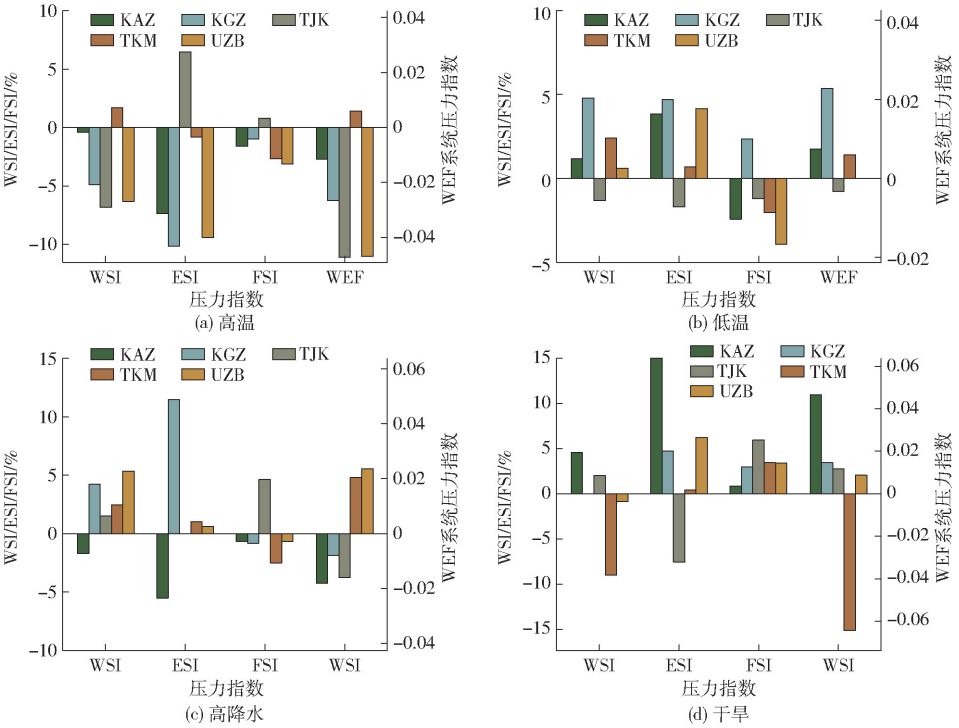


图 5 高温、低温、高降水和干旱极端气候下中亚五国不同部门及 WEF 系统压力指数平均相对变化量

Fig. 5 Mean relative changes in sectoral pressure indices and overall WEF system pressure index across five Central Asian countries under extreme high-temperature, low-temperature, high-precipitation, and drought conditions

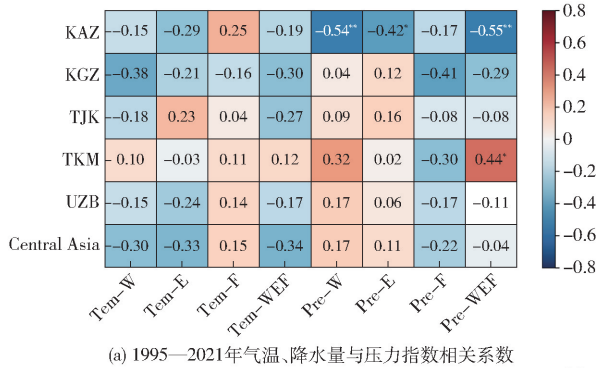
2.4 气候变化对水-能-粮系统压力的影响

2.4.1 气候因子与水-能-粮系统压力相关性

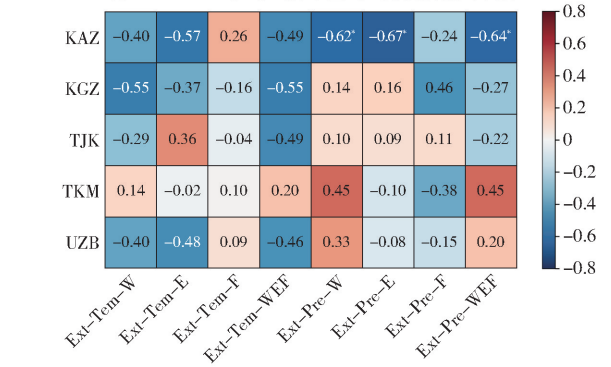
整体而言,气候因子与各部门压力指数的相关性在极端年份显著高于全周期,揭示了极端环境下水-能-粮系统更高的敏感性(图 6,图中 Tem、Pre、W、E、F 分别表示气温、降水量、WSI、ESI、FSI)。

在气温方面,全周期内气温与 WSI 和 ESI 整体呈负相关(图 6a),中亚整体相关系数分别为 -0.30 和 -0.33,而与 FSI 则表现为弱正相关;WEF 系统压力指数与气温整体呈负相关,但土库曼斯坦表现为弱正相关(0.12)。极端气候年份负相关关系明显增强(图 6b),多数国家气温与 WEF 系统压力指数转为较强负相关。哈萨克斯坦极端气温与 ESI 相关系数为 -0.57,吉尔吉斯斯坦与 WSI 及 WEF 系统压力指数相关系数均达到 -0.55,反映出极端高温环境下系统压力的波动与气温变化高度耦合。

在降水量方面,降水量与压力指数的关系在不同尺度和国家间有明显差异(图 6a、6b)。在全周期内,除哈萨克斯坦的 WSI、ESI 与降水量呈显著强负相关(分别为 -0.54^{**} 和 -0.42^{*})外,多数国家呈正相关;在 WEF 系统压力指数上,哈萨克斯坦呈极显著负相关(-0.55^{**}),而土库曼斯坦(TKM)则呈显著正相关(0.44^{*})。极端气候年份区域差异增强,哈萨克斯坦 WSI、ESI 负相关系数高达 -0.62^{*} 和 -0.67^{*},而土库曼斯坦与乌兹别克斯坦则表现出更强的正向压力响应(分别为 0.45 和 0.33)。这种显著的空间异质性,揭示了中亚各国因资源禀赋与经济结构差异,对极端气候的响应具有显著异质性。



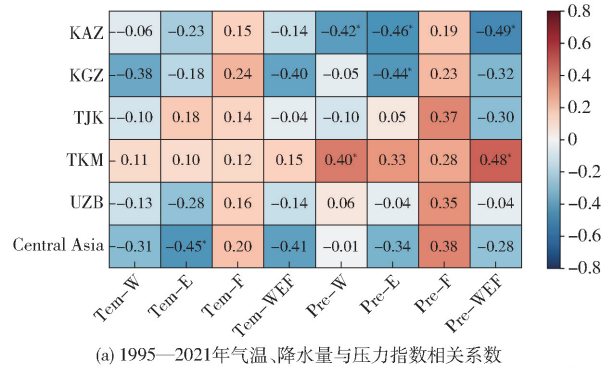
(a) 1995—2021年气温、降水量与压力指数相关系数



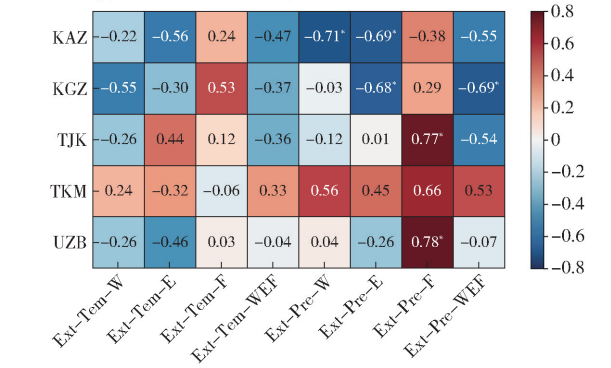
(b) 极端气候年份气温、降水量与压力指数相关系数

图 6　气候因子与不同部门压力指数相关性

Fig. 6　Correlations between climatic factors and sectoral pressure indices



(a) 1995—2021年气温、降水量与压力指数相关系数



(b) 极端气候年份气温、降水量与压力指数相关系数

图 7　气候因子与不同部门压力指数滞后 1 年的相关性

Fig. 7　One-year-lagged correlations between climatic factors and sectoral pressure indices

2.4.2　气候因子对水-能-粮系统压力的滞后效应

整体来看，气候因子对水-能-粮系统压力的影响具有一定的滞后效应，且该效应在极端气候年份中更加明显（图 7），说明极端气候不仅对当年系统造成扰动，还对次年的系统压力产生持续性贡献。

在气温滞后效应方面，前期气温与 WEF 系统压力指数在多数国家呈负相关，中亚整体相关系数为 −0.41，说明前一年的气温波动可在一定程度上缓解次年的综合压力；其中吉尔吉斯斯坦的响应最为明显，体现了其系统较强的延迟反馈特征。此外，前期气温与 FSI 在中亚五国均表现为正相关，揭示了气温变化对农业系统的影响具有跨年度的累积与持续性。在极端气候年份下，这种滞后相关性进一步放大，吉尔吉斯斯坦 FSI 正相关性增加至 0.53（图 7b），而其他国家为弱相关。

在降水滞后效应方面，前期降水的调节作用在不同国家和部门间表现出显著差异。全周期内，哈萨克斯坦的前期降水量与 WSI、ESI 呈显著负相关（分别为 −0.42* 和 −0.46*），表明前一年降水的充沛程度对缓解次年资源紧缺具有重要意义。极端气候年份，这种持续调节作用显著增强。特别是在 FSI 方面，塔吉克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦的前期降水量与其表现出强正相关（分别为 0.77*、0.66 和 0.78*）。这种显著的空间异质性不仅反映了各国资源结构的敏感度差异，更说明哈萨克斯坦对气候变化的持续响应能力最强。

3　讨论

中亚五国不同部门及 WEF 系统压力的变化具有明显异质性，尽管 1995—2021 年不同国家的系统压力有所变化，但区域内部长期形成的相对格局并未发生根本性改变，说明空间差异受资源禀赋的制约严重[13]。1995—2021 年中亚各国 FSI 均呈下降趋势，区域粮食压力整体有所缓解，可能与粮食生产结构调整以及国际贸易对区域粮食供需关系的调节作用增强有关[28-29]。WSI 与 ESI 整体表现为下降趋势，但部分国家仍表现出压力上升的特征，说明局部地区资源矛盾仍未改善，与城市和农田扩张造成水资源与土地资源配置失衡有关[30-31]。整体来看，1995—2021 年中亚 WEF 系统压力有所下降，与以往研究结论基本一致，表明区域资源配置效率与系统协调水平有所提升[22]。与已有研究相似，中亚水-能-粮系统耦合协调度总体呈增长趋势，资源开发利用与跨部门协同管理不断优化，从而在一定程度上缓解了资源约束与系统内部矛盾，推动综合压力指数下降[32-33]。

极端气候加剧中亚 WEF 系统压力波动，并表现出显著的部门异质性与国家差异性。其中，高温与干旱对系统压力扰动最明显，而低温与高降水的影

响相对较弱。研究结果表明,未来中亚地区气温将持续升高,区域干旱程度加剧,冰雪融水过程与径流时序变化将进一步增强季节差异[34-35]。在气候变暖背景下,冰川与积雪融水增加短期内可能提高部分地区灌溉供水能力并缓解粮食压力,哈萨克斯坦北部和东部的谷物产量可受益于生长季延长、冬季气温升高以及冬季降水略有增加[34]。但融雪提前及径流季节分配变化可能削弱夏季稳定供水能力,进而增加农业灌溉、水电调度及跨区域水资源配置的协调难度[9]。土库曼斯坦和乌兹别克斯坦西部可能因季节性变化导致的频繁干旱使棉花减产,并进一步加剧农业灌溉需水压力,恶化区域水资源短缺与人为荒漠化问题[34,36]。持续高温还会增加农业灌溉抽水与居民制冷需求,并推动夏季能源负荷峰值上升,从而进一步强化能源系统压力[10];而季节性径流减少则可能削弱水力发电及热电冷却能力,对区域能源供应稳定性产生不利影响[37]。

不同部门压力变化与 WEF 系统综合压力变化并不完全一致,表明系统压力具有明显的部门权衡特征[29]。本研究发现,在高温条件下,部分部门压力虽呈下降趋势,但 WEF 系统压力却有所增加,说明系统压力并非各部门变化的简单叠加,而是综合反映了不同部门压力变化的共同作用[13]。不同资源部门之间存在复杂的反馈机制,当某一部门压力缓解时,资源需求转移、部门间竞争增强或调度成本上升仍可能导致整体系统脆弱性增加。此外,极端气候年份中气候因子与系统压力间的相关性普遍高于整个研究时期,且存在一定滞后效应,表明气候变化对区域资源系统的影响具有持续性与累积性。

本文在分析极端气候变化对中亚五国水-能源-粮食(WEF)系统压力的影响时,主要关注极端气候年份对不同部门及 WEF 系统整体压力的影响,尚未进一步区分单一极端气候事件与复合极端气候事件的差异性影响。未来研究需深入探讨不同极端气候情景下区域 WEF 系统压力的动态响应机制、跨部门传导路径及耦合反馈过程,结合系统动力学与多模型耦合方法,以提升对复杂资源系统演化过程的刻画能力[38]。同时,应在多源数据融合框架下,整合遥感监测、地面观测及统计数据,构建跨尺度的一体化数据支撑体系[39],降低因数据碎片化导致的不确定性。在此基础上,应进一步完善区域管理政策,强化跨部门协同治理与跨境资源优化配置,并针对中亚地区资源禀赋差异及季节性气候特征,科学制定农业灌溉、能源开发及水资源调控策略[40],从而提升区域 WEF 系统韧性与资源可持续利用能力,促进系统协调发展。

4 结论

(1)WEF 系统压力总体趋于缓解,但资源空间配置失衡依然突出。1995—2021 年,中亚地区不同部门压力整体呈下降趋势,WEF 系统压力总体有所缓解,表明区域资源系统面临的综合压力整体呈下降趋势。其中,WSI 对 WEF 系统压力的贡献最大,是影响系统压力变化的关键因素。然而,部分国家长期处于高压水平,区域内部资源配置不均衡的结构性矛盾依然突出。

(2)极端气候显著加剧系统脆弱性,对系统协调性产生复杂扰动,其影响具有明显的空间异质性和部门差异。研究期内,中亚地区气候呈持续增温趋势,降水空间分布差异显著。高温和干旱条件下,各部门压力波动幅度总体更大,更易引起 WEF 系统波动。

(3)气候因子与 WEF 系统压力之间存在显著相关性及滞后效应,且在极端气候年份进一步增强。气温与 WSI、ESI 及 WEF 系统压力指数整体呈负相关,并表现出一定的滞后响应,其中滞后 1 年后 WEF 系统压力指数与气温的相关性进一步增强;降水则表现为明显的空间差异和区域异质性。

(4)中亚 WEF 系统压力受气候变化、资源禀赋格局及资源利用方式共同驱动。未来在气候变暖和极端气候事件频发背景下,区域资源系统仍面临较大协调压力,需进一步加强资源协同管理与跨部门统筹,提高区域应对气候风险能力,促进水、能源与粮食系统的协调与可持续发展。

参 考 文 献

[1] Karabulut A, Egoh N B, Lanzanova D, et al. Mapping water provisioning services to support the ecosystem - water - food - energy nexus in the Danube River Basin[J]. Ecosystem Services, 2016, 17: 278 - 292.

[2] FAO. The water - energy - food nexus: a new approach in support of food security and sustainable agriculture[R]. Rome: FAO, 2014.

[3] IPCC. Climate change 2023: synthesis report—contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva: IPCC, 2023.

[4] Purwanto A, Sušnik J, Suryadi F X, et al. Water - energy - food nexus: critical review, practical applications, and prospects for future research[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1919.

[5] 谢晓彤,陈松慧,栗滢超,等. 黄河流域人-地-水系统耦合协调时空格局与影响因素[J]. 农业机械学报,2025,56(12):

425 - 435.
Xie Xiaotong, Chen Songhui, Li Yingchao, et al. Spatio-temporal patterns and influencing factors of coupling coordination in human - land - water systems of Yellow River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 425 - 435. (in Chinese)
[6] Darboei A, Azari A, Mirakzadeh A A. Sustainable exploitation of water resources in the framework of water - energy - food nexus in climate change conditions using new multi-objective optimization algorithm MOGWO - 3D [J]. Agricultural Water Management, 2026, 323: 110025.
[7] Yuan Z, Cao M, Chen M, et al. Multi-scale supply-demand security assessment of water - energy - food related ecosystem services from an interaction perspective[J]. Ecological Indicators, 2026, 182: 114584.
[8] 郝帅,孙才志,翟小清. 中国水资源-能源-粮食系统效率时空格局及影响因素[J]. 地理学报,2024,79(9):2389 - 2406.
Hao Shuai, Sun Caizhi, Zhai Xiaoqing. Spatio-temporal pattern and influencing factors of efficiency of water - energy - food system in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(9): 2389 - 2406. (in Chinese)
[9] Scanlon B R, Fakhreddine S, Rateb A, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(2): 87 - 101.
[10] Liu L, He G, Wu M, et al. Climate change impacts on planned supply-demand match in global wind and solar energy systems [J]. Nature Energy, 2023, 8(8): 870 - 880.
[11] Gomez-Zavaglia A, Mejuto J C, Simal-Gandara J. Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems[J]. Food Research International, 2020, 134: 109256.
[12] 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.
[13] Qin J X, Duan W L, Chen Y N, et al. Comprehensive evaluation and sustainable development of water - energy - food - ecology systems in Central Asia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112061.
[14] Cheng Y T, Wang J L, Shu K S. The coupling and coordination assessment of food - water - energy systems in China based on sustainable development goals[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 35: 338 - 348.
[15] Hu Z Y, Zhang C, Hu Q, et al. Temperature changes in Central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets[J]. Journal of Climate, 2014, 27(3): 1143 - 1167.
[16] 刘星才,李灵泠. 气候变化对中亚地区水资源的影响研究进展[J]. 地理科学进展,2025,44(10):2008 - 2020.
Liu Xingcai, Li Lingling. Progress of research on climate change impact on water resources in Central Asia[J]. Progress in Geography, 2025, 44(10): 2008 - 2020. (in Chinese)
[17] Jiang J, Zhou T. Agricultural drought over water-scarce Central Asia aggravated by internal climate variability[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(2): 154 - 161.
[18] Guo L D, Wu Y T, Huang F, et al. An approach to complex transboundary water management in Central Asia: evolutionary cooperation in transboundary basins under the water - energy - food - ecosystem nexus [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119940.
[19] Keyser D J, Fuentes O P, Hayes S D, et al. A review of hydropower in Central Asia: past, present, and future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 226(PA): 116239.
[20] Guo L D, Zhou H W, Xia Z Q, et al. Evolution, opportunity and challenges of transboundary water and energy problems in Central Asia[J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 1918.
[21] Amirkhamza M, Lan C, Ning L, et al. Extreme hydrometeorological conditions and changes in the Amu Darya River Basin in Central Asia[J]. Journal of Hydrometeorology, 2023, 24(2): 315 - 334.
[22] 吴玥葶,郭利丹,井沛然,等. 中亚五国水-能源-粮食-生态耦合关系及时空分异[J]. 干旱区研究,2023,40(4):573 - 582.
Wu Yueting, Guo Lidan, Jing Peiran, et al. Coupling relationship and spatiotemporal differentiation of the water - energy - food - ecology nexus in five Central Asian countries[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 573 - 582. (in Chinese)
[23] FAO. Level of water stress: freshwater withdrawal as a proportion of available freshwater resources[EB/OL]. [2026 - 06 - 16]. https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/en/.
[24] Karan E, Asadi S. Quantitative modeling of interconnections associated with sustainable food, energy and water (FEW) systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200: 86 - 99.
[25] Von Grebmer K, Headey D, Béné C, et al. Indice globale della fame 2013: la sfida della fame: sviluppare la resilienza delle comunità per la sicurezza alimentare e nutrizionale[R/OL]. [2026 - 06 - 16]. https://www.globalhungerindex.org/pdf/it/2013.pdf.
[26] Wang Y, Wu P, Zhao X, et al. Projection pursuit evaluation model: optimizing scheme of crop planning for agricultural sustainable development and soil resources utilization[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2012, 40(6): 592 - 598.
[27] 冯梅青,陈亚宁,焦黎,等. 2000—2019 年新疆水-能源-粮食系统耦合协调发展研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):77 - 84.
Feng Meiqing, Chen Yaning, Jiao Li, et al. Research on the coupling and coordinated development of water - energy - food system in Xinjiang during 2000—2019[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 77 - 84. (in Chinese)
[28] 李琦,李发东,王国勤,等. 乌兹别克斯坦灌溉农业发展及其对生态环境和经济发展的影响[J]. 干旱区地理,2021,44(6):1810 - 1820.
Li Qi, Li Fadong, Wang Guoqin, et al. Development of irrigated agriculture in Uzbekistan and its impact on ecological

environment and economic development[J]. Arid Land Geography,2021,44(6):1810 - 1820. (in Chinese)
[29] Yin C,Zhao W,Fu B, et al. The dual impact of trade on the water - energy - food nexus globally[J]. Nature Sustainability, 2026,9(6):921 - 932.
[30] Duan W,Chen Y,Zou S, et al. Managing the water - climate - food nexus for sustainable development in Turkmenistan[J]. Journal of Cleaner Production,2019,220:212 - 224.
[31] Wang X X,Chen Y N,Li Z, et al. Water resources management and dynamic changes in water politics in the transboundary river basins of Central Asia[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(6):3281 - 3299.
[32] Huang J C, Na Y, Guo Y. Spatiotemporal characteristics and driving mechanism of the coupling coordination degree of urbanization and ecological environment in Kazakhstan[J]. Journal of Geographical Sciences,2020,30(11):1802 - 1824.
[33] Ma Y,Li Y,Huang G, et al. Collaborative management of water - energy - food - ecosystems nexus in Central Asia under uncertainty[J]. Water Resources Research,2024,60(3):e2023WR035166.
[34] Lioubimtseva E,Henebry G. Climate and environmental change in arid Central Asia: impacts, vulnerability, and adaptations [J]. Journal of Arid Environments,2009,73(11):963 - 977.
[35] Qin Y, Abatzoglou J T, Siebert S, et al. Agricultural risks from changing snowmelt[J]. Nature Climate Change,2020,10: 459 - 465.
[36] Liu X, Liu W, Tang Q, et al. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change[J]. Earth's Future, 2022,10: e2021EF002567.
[37] Yalew S G, van Vliet M T H, Gernaat D E H J, et al. Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios[J]. Nature Energy,2020,5:794 - 802.
[38] Tripathy K P,Mukherjee S,Mishra A K, et al. Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2023,120(28): e2219825120.
[39] Wang X, Duan W, Zou S, et al. Mapping the evolution of the water - energy - food - ecosystem (WEFE) nexus: a comprehensive review of the methods, scales, and sustainability challenges[J]. Geography and Sustainability,2026,7(3): 100447.
[40] 周子朝,孙玮,顾峰雪. 中国水-粮食-生态系统耦合关系及时空分异[J]. 中国农业资源与区划,2026,47(1):92 - 104.
Zhou Zizhao,Sun Wei,Gu Fengxue. Coupling relationships and spatiotemporal variations of water - food - ecology system in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2026,47(1):92 - 104. (in Chinese)

(上接第 161 页)

[22] Xu B, Huang X, Mo R, et al. Integrated real-time flood risk identification, analysis, and diagnosis model framework for a multireservoir system considering temporally and spatially dependent forecast uncertainties[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126679.
[23] Zhang Y, Zhou W, Wang J, et al. Study on the impact of multi-source uncertainty on the operation of inter-basin water transfer projects and adaptive response strategies[J]. Journal of Hydrology, 2025, 660: 133375.
[24] 李霆. 石羊河流域主要农作物水分生产函数及优化灌溉制度的初步研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2005.
Li Ting. Pilot study on water production functions and optimal irrigation schedule of main crops in Shinyang River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005. (in Chinese)
[25] 康绍忠,粟晓玲,杜太生,等. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式:以甘肃石羊河流域为例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
[26] Wang Y, Kang S, Li F, et al. Modified water-nitrogen productivity function based on response of water sensitive index to nitrogen for hybrid maize under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106566.
[27] Chen S, Wang S, Shukla M K, et al. Delineation of management zones and optimization of irrigation scheduling to improve irrigation water productivity and revenue in a farmland of Northwest China[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(3): 655 - 677.
[28] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报,2015, 30(8):1243 - 1254.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(8): 1243 - 1254. (in Chinese)
[29] 尚海洋,刘丽娇. 近 20 年石羊河流域生态系统服务价值演化及生态与经济协调发展研究[J]. 生态科学,2024,43(6): 10 - 20.
Shang Haiyang, Liu Lijiao. Research on the evolution of ecosystem service value and coordinated development of ecology and economy in Shiyang River Basin in the past 20 years[J]. Ecological Science, 2024, 43(6): 10 - 20. (in Chinese)
[30] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, PART I: solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 18(4): 577 - 601.
[31] Jia D, Zhang T, Wu L, et al. Multi-objective cooperative optimization of reservoir scheduling and water resources allocation for inter-basin water transfer project based on multi-stage coupling model[J]. Journal of Hydrology, 2024, 630: 130673.