



气候变化对中亚五国粮食安全的影响

苏芳¹, 刘钰², 陈律凡³, Rustam OROZBAEV⁴, 谭亮成^{3,5*}

1. 西北大学经济管理学院, 西安 710127;

2. 陕西科技大学经济与管理学院, 西安 710021;

3. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;

4. Institute of Geology, National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Bishkek 720040, Kyrgyzstan;

5. 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710049

* 通讯作者, E-mail: tanlch@ieecas.cn

收稿日期: 2022-10-07; 收修改稿日期: 2023-09-02; 接受日期: 2023-10-07; 网络版发表日期: 2023-12-15

中国科学院“西部之光——西部交叉团队”项目(编号: xbzg-zdsys-202217)和山东省专项经费项目(编号: LSKJ202203300)资助

摘要 随着全球气候变暖趋势的逐渐加剧, 气候变化对粮食安全造成的影响引发社会各界广泛关注. 中亚国家深处亚洲内陆, 生态环境脆弱, 农业技术较低, 面临着严峻的气候变化威胁. 基于1990~2019年中亚五国的面板数据, 构建了C-D-C模型, 研究气候变化对该区粮食安全的影响, 并预测未来发展趋势. 研究发现, 过去30年中亚五国粮食安全水平整体呈上升趋势, 其中哈萨克斯坦粮食安全指数较高, 而塔吉克斯坦粮食安全水平较低. 年均温和年降水对五国的粮食安全影响存在倒U型关系, 其中对哈萨克斯坦粮食安全的积极影响最大; 极端高温和极端低温对中亚五国粮食安全具有显著的负向影响, 其中对土库曼斯坦粮食安全的消极影响最大; 霜冻日数对粮食安全的影响不显著. 未来气候预测结果显示, 2030~2090年中亚气温和降水量有继续升高趋势, 整体将对五国粮食安全具有持续抑制作用. 建议各国提高气候风险认识, 加强气候科学研究, 提前制定多方适应策略; 同时, 加强国际合作, 有效减少温室气体排放, 强化保障粮食安全的能力.

关键词 全球变暖, 极端气候, 粮食安全, 未来预测, 中亚五国

1 引言

粮食安全是国家安全的基础, 是经济发展、社会稳定的基石(叶明华和庾国柱, 2015; 王钢和钱龙, 2019), 主要包括粮食可用性、可获得性、可利用性、稳定性四方面(李腾飞和亢霞, 2016; 公茂刚和王学真, 2017; 韩芳玉等, 2019; 丑洁明等, 2022). 当前, 全球面临着严重的粮食安全问题, 据《2021年世界粮食安全

和营养状况》报告(<http://www.fao.org/3/cb4474en/cb4474en>)估计, 到2030年全球可能仍有约6.6亿人面临食物不足的困境, 严重缺乏粮食和营养保障的人口也将迅速增加. 正在进行的俄乌冲突进一步加剧了全球粮食危机, 截至2022年2月, 受俄乌冲突影响, 已有约110万人需要粮食和生计援助, 约40万人面临粮食安全问题(钟钰等, 2022).

粮食安全与气候变化紧密相关, 气候变化特别是

中文引用格式: 苏芳, 刘钰, 陈律凡, Orozbaev R, 谭亮成. 2024. 气候变化对中亚五国粮食安全的影响. 中国科学: 地球科学, 54(1): 281–293, doi: [10.1360/SSTe-2022-0316](https://doi.org/10.1360/SSTe-2022-0316)

英文引用格式: Su F, Liu Y, Chen L, Orozbaev R, Tan L. 2024. Impact of climate change on food security in the Central Asian countries. Science China Earth Sciences, 67(1): 268–280, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1198-4>

极端气候日益影响粮食产量、质量、价格以及供应链(张强等, 2017; 樊胜根等, 2019; 欧阳竹等, 2020; 庞艳梅等, 2020; 陈睿山等, 2021)。当前, 以气温上升、降水不稳定、CO₂浓度增加、极端气候事件为主要表征的气候变化导致高温干旱加剧、土壤肥力下降、病虫害增加、土地退化等现象频发(董婉璐等, 2014; Grace等, 2019; Liu等, 2020; Holtermann, 2020; Kusainova等, 2020; Rehman等, 2021), 影响了粮食生产、获得与利用, 引发粮价波动, 阻碍粮食供应链畅通, 对粮食安全造成严重影响(Brizmohun, 2019; 许吟隆等, 2020; Mirzabaev等, 2023; Javadi等, 2023; 李满春等, 2023)。然而, 气候变化对粮食作物生产的具体影响复杂。例如, 已有研究发现气候变暖使玉米和大豆耐旱能力增强, 但生产力有所下降(Yu等, 2021); 而且, 不同气候变量对作物产量的影响不同。有学者发现, 尽管降水量的增加不利于印度地区水稻和小麦产量的提升, 但气温升高对所有粮食作物都有积极影响(Mishra, 2020)。也有研究证实了北非和东非国家的粮食供应数量受到气候变化的不利影响(Fusco, 2022)。还有学者研究发现二氧化碳浓度的增加和全球温度的升高会使农作物产量增加, 然而, 极端气候事件发生频率的增加正在导致作物产量降低(Mirón等, 2023)。芬兰研究机构一项研究表明, 如果不控制温室气体排放, 到21世纪末期, 全球约有30%的粮食会进入零产量状态(张宁, 2021)。

中亚五国地处欧亚大陆腹地(图1), 生态环境脆弱。目前, 中亚各国的安全形势、经济发展以及贸易投资环境都存在不确定性, 经济下行压力较大、债务风险上升、民生问题突出(王志章和杨珂凡, 2021)。此外, 中亚国家的历史渊源、地理位置及气候特征导致其长期面临经济结构不合理、对外依存度高, 且普遍存在农业投入资金不足, 农业生产技术落后等问题, 严重制约了粮食全产业链的发展(李睿思, 2022)。该区人口出生率和自然增长率较高, 特别是近二三十年来绝对人口数量迅速增加, 除哈萨克斯坦外, 其他四国都面临粮食供需不平衡的困境(Sun和Zhang, 2021)。当前的全球变暖正在深刻地改变中亚地区的气候和环境。在过去的半个多世纪, 中亚地区温度显著升高, 高于全球平均增温速率(He等, 2021)。在升温背景和人类活动的影响下, 该区冰川退化, 河川径流减少, 水资源状况持续恶化(Ma等, 2015; Chen等, 2017; 杨胜天等, 2017)。中亚五国这一生态脆弱区的粮食安全现状如何? 气候变化对中亚五国

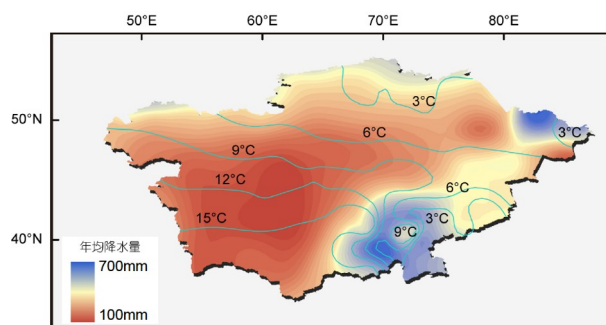


图1 1990~2019年中亚平均气温与降水

粮食安全有什么影响? 中亚五国粮食安全未来发展趋势如何? 这些问题的回答不但能为中亚地区应对气候变化冲击, 保障粮食安全提供有益的政策启示, 对整个亚欧大陆的安全形式预判也能提供重要的科学依据。

基于此, 本研究利用1990~2019年中亚五国面板数据, 探究气候变化对粮食安全的作用机制、影响及未来适应策略。相较以往单一的粮食安全衡量指标, 本研究从粮食可用性、可获得性、可利用性、稳定性等方面综合考量粮食安全水平; 另外, 针对中亚国家不同国情进行异质性分析, 获得气候变化冲击下不同国家的粮食安全水平现状, 探讨气候变化及极端气候对粮食安全的作用机制。最后, 基于气候变化预测结果, 提出了未来中亚地区粮食安全保障的政策建议。

2 数据和方法

2.1 数据来源

本研究选取1990~2019年中亚五国的面板数据来验证气候变化对粮食安全的影响。年均温、年降水、极端高温、极端低温、霜冻日数数据均来源中亚五国气象网站; 粮食安全、农业科技投入、农药使用量、化肥施用量、农业劳动力数据来源于联合国粮农组织官网数据库; 第一产业增加值、第一产业外资投入数据来源世界贸易组织数据库; 未来气候预测数据来源联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)数据库等。

2.2 变量说明

基于相关学者的研究成果, 本研究形成以粮食可用性、可获得性、稳定性、可利用性4个变量为二级指标, 以平均膳食能量供应充足率等14个变量为三级指标的粮食安全指标体系(胡岳岷和刘元胜, 2013; 姚

成胜等, 2015; 李腾飞和亢霞, 2016; 公茂刚和王学真, 2017)(图2). 气候变化为本研究的核心解释变量¹⁾, 选取年均温、年降水量、极端高温、极端低温、霜冻日数作为气候变化的衡量因子(韩芳玉等, 2019; Zhao等, 2021). 此外, 本研究引入了农业科技投入、农药使用量、化肥施用量、农业劳动力、第一产业增加值、第一产业外资投入为控制变量(Wang和Huang, 2018; 崔明明和聂常虹, 2019; Smith和Archer, 2020; Zhang和Yu, 2021). 所有变量的测度方法见表1.

2.3 模型构建

粮食安全保障过程是社会经济因素和自然因素相互作用的结果(Li等, 2021). 社会经济因素包括化肥、农药、科技、劳动力等物质投入要素, 而自然因素中尤以气候要素最为重要. 传统的C-D生产函数模型仅将部分可控并且数量有限的要素考虑在内, 但对气候要素关注不足, 气候变化背景下, 气温、降水、极端气候等气候要素变化对粮食生产的影响更加明显(韩芳玉等, 2019). 因此, 本文参照近期新发展的研究方法(Yang等, 2020; 丑洁明等, 2022), 以C-D生产函数模型

为基础, 将气候要素引入模型中, 构建“经济-气候”模型(“C-D-C”模型), 分析气候要素对粮食安全的影响. 同时, 为了更加全面、科学地反映影响粮食安全的因素, 模型中还引入物质要素等控制变量. 模型1计算公式如式(1), 其中, Y 代表粮食安全, C 代表气候要素, T 代表农业科技投入, N 代表农药使用量, H 代表化肥施用量, L 代表农业劳动力, G 代表第一产业增加值, I 代表第一产业外资投入.

$$Y = F(C, T, N, H, L, G, I). \quad (1)$$

模型2引入气候要素的二次项, 计算公式如式(2)所示, 其中, $Y_{i,t}$ 表示第*i*个国家第*t*年的粮食安全指数, $Q_{i,t}$ 、 $J_{i,t}$ 、 $K_{i,t}$ 、 $O_{i,t}$ 、 $S_{i,t}$ 分别代表第*i*个国家第*t*年的年均温、年降水量、极端高温、极端低温和霜冻日数, $\mu_{i,t}$ 代表误差项, $\varepsilon_{i,t}$ 代表随机扰动项.

$$\begin{aligned} Y_{i,t} = & \alpha_0 + \alpha_1 T_{i,t} + \alpha_2 N_{i,t} + \alpha_3 H_{i,t} + \alpha_4 L_{i,t} \\ & + \alpha_5 G_{i,t} + \alpha_6 J_{i,t} + \beta_1 Q_{i,t} + \beta_2 J_{i,t} + \lambda_1 K_{i,t} \\ & + \lambda_2 O_{i,t} + \lambda_3 S_{i,t} + \beta_3 (Q_{i,t})^2 + \beta_4 (J_{i,t})^2 \\ & + \lambda_4 (K_{i,t})^2 + \lambda_5 (O_{i,t})^2 + \lambda_6 (S_{i,t})^2 + \mu_{i,t} + \varepsilon_{i,t}. \end{aligned} \quad (2)$$

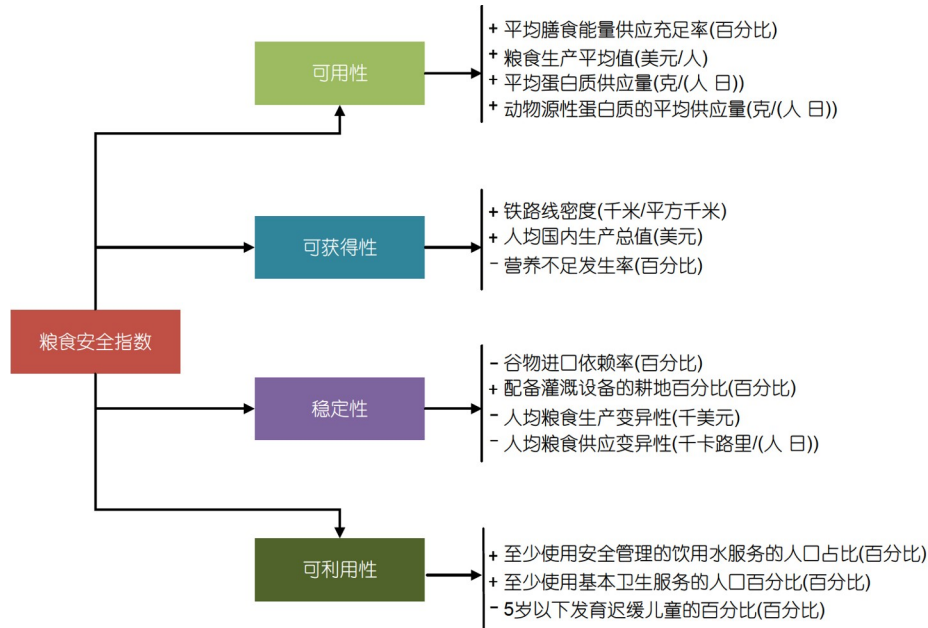


图2 粮食安全指标体系

指标向性中“+”表示指标取值越大, 粮食安全水平越高; “-”表示指标取值越大, 粮食安全水平越低

1) 数据处理中, 本研究首先对中亚五国各州(直辖市)主要城市气象站点逐日数据进行逐月处理得出月度数据, 其次根据月度数据计算出年度数据.

表 1 变量说明及统计描述^{a)}

变量名称	变量含义	最小值	最大值	均值
粮食安全	粮食安全指数	0.03	1.00	0.46
年均温	年气温均值(℃)	0.72	1.24	1.04
年降水	年总降水量(mm)	1.93	2.77	2.42
极端高温	日最高气温的第90%分位值(℃)	1.03	1.38	1.24
极端低温	日最低气温的第10%分位值(℃)	-1.14	1.05	0.53
霜冻日数	日最低气温≤0℃的日数(日)	1.49	2.25	2.00
农业科技投入	农业科研投入经费(万美元)	2.41	4.05	3.39
农药使用量	农药总使用量(t)	0.38	0.61	0.53
化肥施用量	化肥总使用量(t)	3.30	4.22	3.72
农业劳动力	农业从业人员(万人)	1.73	5.25	3.39
第一产业增加值	第一产业增加值(万美元)	4.39	5.48	4.86
第一产业外资投入	第一产业外资投入(万美元)	1.52	4.84	3.68

a) 所有变量数据皆取对数

为更加深入地考量气候变化对粮食安全的区域差异, 本研究设置5个区域虚拟变量: 哈萨克斯坦 $D_1 = 1$, 其他国家 $D_1 = 0$; 塔吉克斯坦 $D_2 = 1$, 其他国家 $D_2 = 0$; 土库曼斯坦 $D_3 = 1$, 其他国家 $D_3 = 0$; 乌兹别克斯坦 $D_4 = 1$, 其他国家 $D_4 = 0$; 吉尔吉斯斯坦 $D_5 = 1$, 其他国家 $D_5 = 0$.

$$\begin{aligned} Y_{i,t} = & \alpha_0 + \alpha_1 T_{i,t} + \alpha_2 N_{i,t} + \alpha_3 H_{i,t} \\ & + \alpha_4 L_{i,t} + \alpha_5 G_{i,t} + \alpha_6 J_{i,t} + \beta_1 Q_{i,t} \\ & + \beta_2 J_{i,t} + \lambda_1 K_{i,t} + \lambda_2 O_{i,t} + \lambda_3 S_{i,t} \\ & + \sum_{m=1}^5 \rho_m D_m \times Q_{i,t} + \sum_{m=1}^5 \varphi_m D_m \times J_{i,t} \\ & + \sum_{m=1}^5 \chi_m D_m \times K_{i,t} + \sum_{m=1}^5 \theta_m D_m \times O_{i,t} \\ & + \sum_{m=1}^5 \pi_m D_m \times S_{i,t} + \mu_{i,t} + \varepsilon_{i,t}. \end{aligned} \quad (3)$$

3 结果

3.1 中亚五国粮食安全变化趋势

通过对粮食安全指数数据整理, 得到1990~2019年中亚五国粮食安全变化趋势(图3)和不同时间节点的粮食安全指数(表2)。由图3和表2所示, 1990~2019年中亚五国粮食安全指数0和1之间浮动。总体来看, 粮食安全水平整体呈上升趋势, 中亚五国中, 哈萨克斯坦粮食安全指数基本保持在较高水平且变动幅度最大; 土库

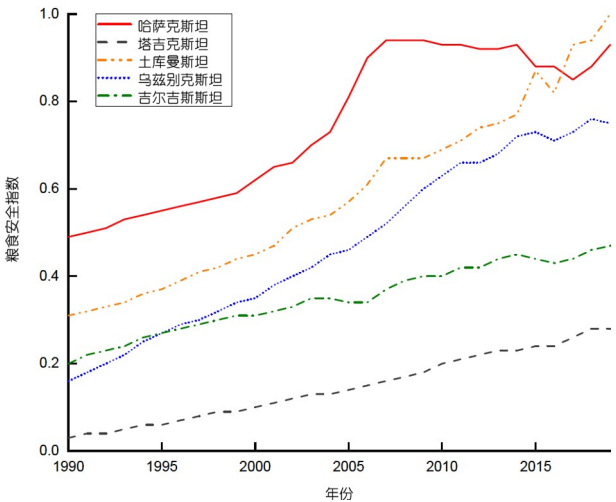


图 3 1990~2019年中亚五国粮食安全变化趋势

曼斯坦粮食安全指数增速最快, 并在2016年超过哈萨克斯坦居于首位; 乌兹别克斯坦粮食安全指数在1995年超过吉尔吉斯斯坦, 此后粮食安全水平稳居第三位; 吉尔吉斯斯坦粮食安全水平位于第四位, 塔吉克斯坦粮食安全水平始终处于末位。这种结果可能的原因是, 哈萨克斯坦农业科技投入相对较高, 农业劳动力相对充足, 粮食产量基数大且以正增长为主, 在中亚五国中粮食安全压力较低, 是本区域乃至世界的产粮大国; 土库曼斯坦作为永久中立国, 在复杂多变的国际经济形势下, 社会经济发展一直保持良好状态, 为保障粮

食安全提供了稳定的社会条件; 土库曼斯坦历来重视农业发展, 粮食产量逐年提升, 人口较少, 人均粮食占有量较高. “一带一路”倡议实行后, 土库曼斯坦与中国在现代化农业领域的合作逐渐加深, 推动了该国农业的发展.

通过对粮食安全二级指标数据整理, 得到

1990~2019年中亚五国粮食可用性、可获得性、稳定性、可利用性变化趋势(图4). 由图4所示, 中亚五国粮食可用性整体呈上升趋势, 哈萨克斯坦粮食可用性指数在0.6~1.0之间浮动, 稳居五国第一位, 乌兹别克斯坦粮食可用性分别于2009、2012年超过吉尔吉斯斯坦和土库曼斯坦位于第二位, 塔吉克斯坦粮食可用性水

表 2 中亚五国不同时间节点粮食安全指数^{a)}

国家	1990年	2000年	2010年	2019年
哈萨克斯坦	0.49	0.62	0.93	0.93
塔吉克斯坦	0.03	0.10	0.20	0.28
土库曼斯坦	0.31	0.45	0.69	1.00
乌兹别克斯坦	0.16	0.35	0.63	0.75
吉尔吉斯斯坦	0.20	0.31	0.40	0.47

a) 中亚五国粮食安全指数时间节点以10年为间隔

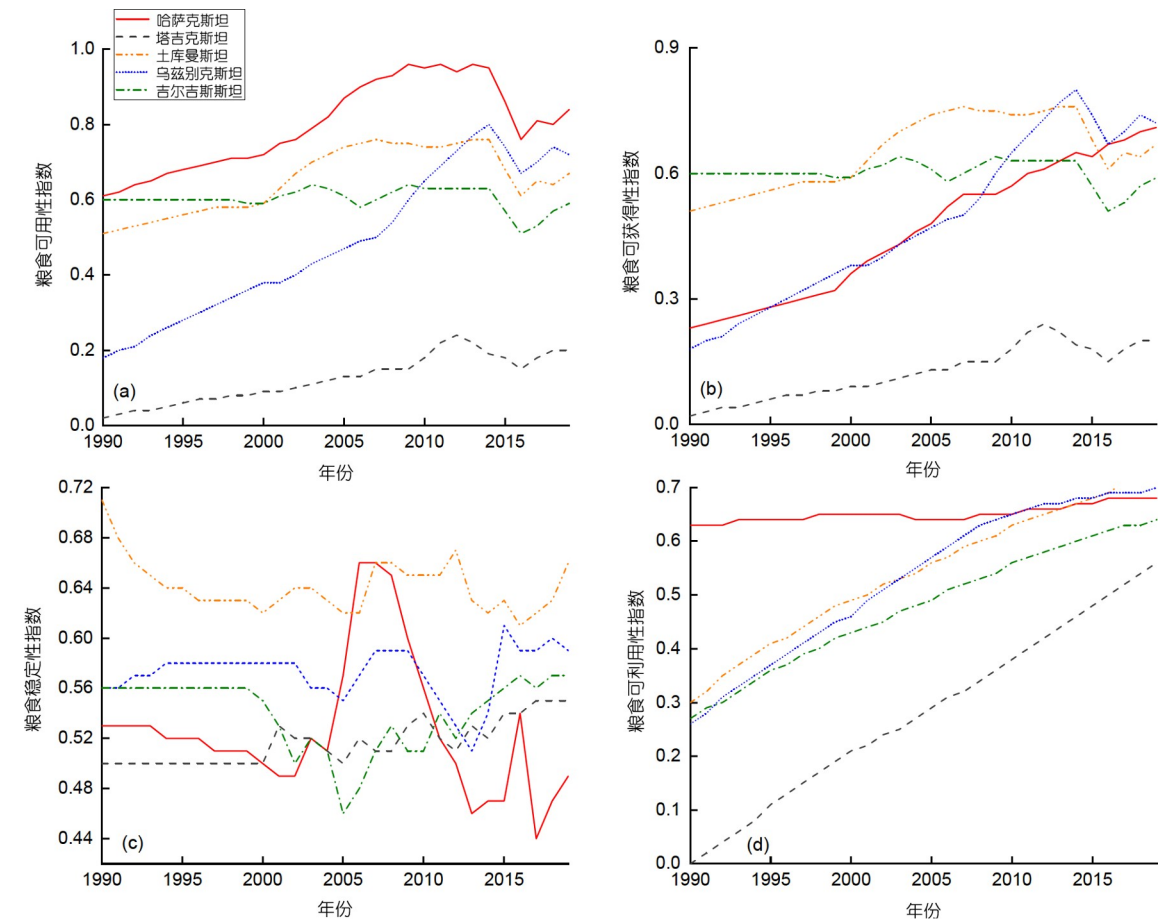


图 4 1990~2019年中亚五国粮食安全二级指标变化趋势

(a) 1990~2019年中亚五国粮食可用性变化趋势; (b) 1990~2019年中亚五国粮食可获得性变化趋势; (c) 1990~2019年中亚五国粮食稳定性变化趋势; (d) 1990~2019年中亚五国粮食可利用性变化趋势

平依旧垫底; 中亚五国粮食可获得性整体呈上升趋势, 吉尔吉斯斯坦和土库曼斯坦粮食可获得性指数较高, 在0.5~0.75之间浮动, 乌兹别克斯坦粮食可获得性涨幅最明显, 在2012年位于五国首位, 塔吉克斯坦始终处于末位; 中亚五国粮食稳定性在四个二级指标中变动幅度最为激烈, 土库曼斯坦粮食稳定性水平最高, 其次分别是乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦, 哈萨克斯坦粮食稳定性指数波动频率最大; 中亚五国粮食可利用性指数整体呈上升趋势, 哈萨克斯坦粮食可利用性指数整体水平较高, 在0.6~0.65之间浮动, 土库曼斯坦和乌兹别克斯坦粮食可利用性指数后来居上, 在2014年超过哈萨克斯坦, 塔吉克斯坦粮食可利用性指数整体涨幅较高, 但依旧居于末位。

3.2 中亚五国气候变化趋势

图5展示了中亚五国年均温、年降水量、霜冻日数、极端高温、极端低温气候要素变化趋势。中亚五国年均温总体呈上升趋势, 在9.5~13℃区间内浮动, 并在1999、2004年出现两个较为明显的高峰值, 在1993、1996、2014年出现三个低谷值。中亚五国年降水总体较不稳定, 呈现先升后降而后逐渐平缓的

趋势, 在1993年出现降水高峰值, 在1995和2008年出现两个降水低谷值。中亚五国霜冻日数每年波动较为明显, 一年霜冻期基本维持在3个月以上, 1992、1994和2014年出现三个霜冻高峰期, 1999和2004年霜冻期较短。极端高温和极端低温变化趋势与年均温曲线基本保持一致, 维持在相对稳定的状态, 极端高温在18~20℃之间浮动, 极端低温在3~5℃区间浮动。

3.3 年均气候对粮食安全的影响

通过数据处理得到年均气候对粮食安全影响的回归结果(表3)。表3显示, 模型1年均温与年降水对粮食安全均有显著的负向影响。模型2年均温一次项和二次项系数分别为正数(1.357)和负数(-0.475), 表明年均温与粮食安全存在倒U型非线性关系; 单从模型2年降水的一次项和二次项系数来看, 年降水与粮食安全也存在倒U型非线性关系。这说明, 当年均温和年降水维持在某个特定范围内时, 适当提升年均温与年降水量会有利于保障粮食安全, 一旦年均温与年降水超过某个点后, 年均温的提升和年降水的增加会导致粮食安全水平的降低。控制变量中, 农业科技投入、农业

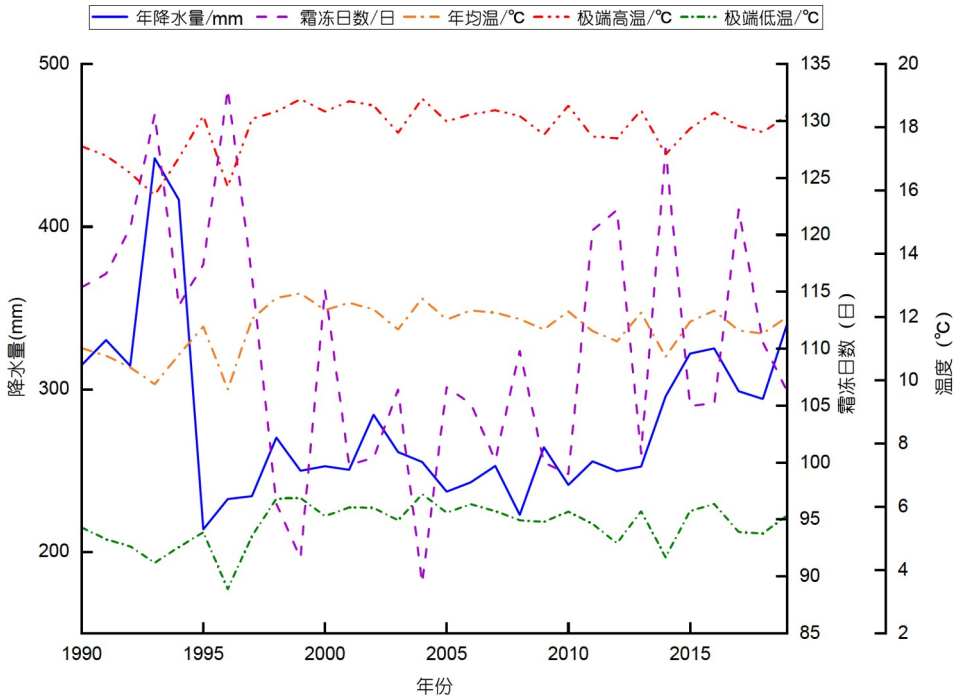


图5 1990~2019年中亚五国气候变化趋势

表 3 年均气候对中亚整体粮食安全的影响结果^{a)}

变量名称	模型1		模型2	
	系数	稳健标准误	系数	稳健标准误
年均温	-0.394***	0.039	1.357**	0.683
年降水	-0.038*	0.023	0.202	1.563
年均温二次项			-0.475*	0.334
年降水二次项			-0.047	0.321
农业科技投入	1.262***	0.463	1.331***	0.513
农药使用量	-6.068*	0.463	-6.557*	3.685
化肥使用量	-0.274***	0.094	-0.262**	0.103
农业劳动力	0.075**	0.033	0.072**	0.029
第一产业增加值	0.040	0.117	0.022	0.128
第一产业外资投入	0.038*	0.022	0.035*	0.021
常数项	0.416	0.271	0.648	2.381
R^2	0.880		0.881	

a) *, **和***分别表示在10%、5%和1%的置信水平上显著

劳动力、第一产业外资投入皆对粮食安全具有显著的正向影响, 其中, 农业科技投入影响最大, 农药使用量和化肥使用量对粮食安全具有负向影响。

进一步将研究区域细分, 我们发现年均温对哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦和吉尔吉斯斯坦粮食安全的影响系数分别是0.407、0.184、0.303、-0.284和0.167(表4), 年降水对哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦粮食安全的影响系数分别是0.151、0.024、0.006、0.019、0.020(表4), 表明年均气候对哈萨克斯坦粮食安全的积极影响最强。

3.4 极端气候事件对粮食安全的影响

表5展示了极端气候事件对粮食安全影响的回归结果。模型1极端高温和极端低温在5%的显著性水平下对粮食安全具有负向影响, 霜冻日数对粮食安全的影响不显著。模型2中仅有极端低温的一次项和二次项对粮食安全的影响显著, 且系数皆为负数, 表明以极端低温对粮食安全具有较大的威胁性。控制变量中农业科技投入、农业劳动力、第一产业外资投入对粮食安全具有显著的正向影响, 农药和化肥使用量对粮食安全具有负向作用。

极端高温对哈萨克斯坦和土库曼斯坦两国的粮食安全具有显著的负向影响, 其中, 对土库曼斯坦粮食安

全的消极作用最大。极端低温对塔吉克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦三国的粮食安全具有消极影响, 土库曼斯坦粮食安全受到的负向影响最强。霜冻日数对中亚五国粮食安全的影响并不显著(表6)。

3.5 未来气候变化对粮食安全的贡献率预测

在以上研究的基础上, 本研究进一步探究未来不同气候变化情境下粮食安全的发展趋势。

IPCC AR6根据第六次耦合模式比较计划(CMIP6)模拟结果给出了全球各区域未来地表气温和降水变化的预测结果(IPCC WGI Interactive Atlas), 共包括5种共享社会经济路径情景: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0和SSP5-8.5。本研究提取中亚五国在SSP1-2.6、SSP5-8.5两大气候情景下的气候预测结果。SSP1-2.6作为次佳情景, 是指全球二氧化碳排放按照严格标准削减, 到2050年后达到零排放; SSP5-8.5是报告中最差情况, 二氧化碳排放水平到世纪中叶大约增加一倍, 到2100年, 全球平均气温上升4.4℃。结果显示中亚地区近期(2026~2035年)、中期(2046~2055年)、远期(2086~2095年)年均气温与降水变化在两种气候情景下都将处于上升状态(表7)。SSP5-8.5情境下未来气温上升与降水增加的速度更快, 2090年中亚五国气温将上升6.1℃, 降水将增加8.8%。

表 4 年均气候对中亚粮食安全的区域差异性影响结果^{a)}

变量	系数	Z统计量	变量	系数	Z统计量
年均温	-0.195*** (0.062)	-3.150	年均温*D ₃	0.303*** (0.073)	-4.150
年降水	-0.009 (0.007)	-1.330	年均温*D ₄	-0.284 (0.031)	-8.920
农业科技投入	1.138*** (0.362)	3.140	年均温*D ₅	0.167*** (0.022)	-7.470
农药使用量	-4.848 (3.825)	-1.270	年降水*D ₁	0.151*** (0.052)	-2.860
化肥使用量	-0.597*** (0.158)	-3.760	年降水*D ₂	0.024*** (0.007)	-3.140
农业劳动力	0.090*** (0.032)	2.770	年降水*D ₃	0.066 (0.036)	1.820
第一产业增加值	0.106 (0.118)	0.900	年降水*D ₄	0.019** (0.009)	-2.090
第一产业外资投入	-0.040* (0.021)	-1.840	年降水*D ₅	0.020*** (0.006)	-2.910
年均温*D ₁	0.407** (0.193)	2.100	常数项	0.506** (0.244)	2.070
年均温*D ₂	0.184*** (0.021)	-8.400	R ²	0.882	

a) *、**和***分别表示在10%、5%和1%的置信水平上显著, 括号内为稳健标准误差

表 5 极端气候事件对中亚整体粮食安全的影响结果^{a)}

变量名称	模型1		模型2	
	系数	稳健标准误	系数	稳健标准误
极端高温	-0.471**	0.205	-0.029	0.995
极端低温	-0.029**	0.011	-0.092*	0.054
霜冻日数	-0.014	0.090	-0.819	0.710
极端高温二次项			0.095	0.448
极端低温二次项			-0.086**	0.043
霜冻日数二次项			0.217	0.185
农业科技投入	1.254**	0.476	-6.245	3.890
农药使用量	-5.889*	3.503	-6.557*	3.685
化肥使用量	-0.291***	0.098	-0.275**	0.107
农业劳动力	0.071**	0.122	0.039	0.031
第一产业增加值	0.035	0.117	0.022	0.102
第一产业外资投入	0.040*	0.021	0.030	0.018
常数项	0.589**	0.258	0.663	1.197
R ²		0.883		0.885

a) *、**和***分别表示在10%、5%和1%的置信水平上显著

SSP1-2.6情境下的未来气候变化情况相对平缓, 到2090年, 气温将上升1.7℃, 降水将增加4.5%.

未来气候变化对粮食安全的贡献率如表8所示, 其中气候变量系数 α 直接引用表3中的结果, 气候变量变

表 6 极端气候事件对中亚粮食安全的区域差异性影响结果^{a)}

变量	系数	Z统计量	变量	系数	Z统计量
极端高温	-0.780* (0.416)	-1.880	极端高温*D ₅	0.400 (0.255)	1.570
极端低温	-0.066 (0.057)	-1.170	极端低温*D ₁	-0.029 (0.049)	-0.600
霜冻日数	-0.409** (0.189)	-2.160	极端低温*D ₂	-0.131* (0.079)	-1.660
农业科技投入	1.240*** (0.371)	3.340	极端低温*D ₃	-1.953*** (0.516)	-3.780
农药使用量	-5.829** (2.849)	-2.050	极端低温*D ₄	0.277 (0.523)	0.530
化肥使用量	-0.334*** (0.124)	-2.690	极端低温*D ₅	-0.044* (0.051)	-0.85
农业劳动力	0.069** (0.035)	1.980	霜冻日数*D ₁	-0.012 (0.022)	-0.580
第一产业增加值	0.098 (0.126)	0.780	霜冻日数*D ₂	-0.144 (0.082)	-1.750
第一产业外资投入	-0.034 (0.034)	-1.000	霜冻日数*D ₃	0.068 (0.079)	0.850
极端高温*D ₁	-0.258* (0.165)	-1.560	霜冻日数*D ₄	0.066 (0.130)	0.510
极端高温*D ₂	0.235 (0.164)	1.430	霜冻日数*D ₅	-0.180 (0.132)	-1.360
极端高温*D ₃	-1.651*** (0.473)	-3.490	常数项	0.286*** (0.047)	6.070
极端高温*D ₄	-0.163 (0.545)	-0.300	R ²	0.883	

a) *、**和***分别表示在10%、5%和1%的置信水平上显著, 括号内为稳健标准误差

表 7 中亚五国未来平均地表气温与降水变化^{a)}

年份	SSP5-8.5情境		SSP1-2.6情境	
	气温上升(°C)	降水增加(%)	气温上升(°C)	降水增加(%)
2030	1.4	2.2	1.2	3.1
2050	2.7	4	1.6	4.1
2090	6.1	8.8	1.7	4.5

a) 以1995~2014年中亚地区的气候平均值为基线得出, 数据为10年平均值, 如“2030”表示2026~2035年的平均值

化率 b 是以各变量2030~2090年平均值相对1994~1996年平均值的变化率。每个气候变量对粮食安全的贡献率 c 为气候变量系数 a 与气候变量变化率 b 的乘积。表8显示, 两种情境下气候变化对粮食安全的贡献率皆为负向影响。21世纪中叶, SSP5-8.5情境未来气候变化对粮食安全的贡献率为-0.595, 到2090年贡献率高达-1.038, 远远高于SSP1-2.6情境下-0.366和-0.388的贡献率。可见, 温室气体排放度越高, 未来气候变化对

中亚粮食安全的影响越严峻, 且随着时间推移, 负向影响会加剧。

4 讨论

4.1 气候变化背景下中亚五国粮食安全的适应行动

中亚五国拥有丰富的土地资源, 光热资源丰富, 农业劳动力占比较大, 但存在水资源不足、生产加工技

表 8 未来气候变化对粮食安全的贡献率

气候情境	年份	气候变量	气候变量系数 a	气候变量变化率 b	贡献率 $c=a \times b$
SSP5-8.5情境	2030	气温变动	-0.394	0.093	-0.037
		降水量变动	-0.038	8.956	-0.340
		气候变化			-0.377
	2050	气温变动	-0.394	0.251	-0.099
		降水量变动	-0.038	13.045	-0.496
		气候变化			-0.595
	2090	气温变动	-0.394	0.587	-0.231
		降水量变动	-0.038	21.222	-0.806
		气候变化			-1.038
SSP1-2.6情境	2030	气温变动	-0.394	0.112	-0.044
		降水量变动	-0.038	7.983	-0.303
		气候变化			-0.347
	2050	气温变动	-0.394	0.121	-0.048
		降水量变动	-0.038	8.372	-0.318
		气候变化			-0.366
	2090	气温变动	-0.394	0.177	-0.070
		降水量变动	-0.038	8.372	-0.318
		气候变化			-0.388

术和开发资金匮乏的问题(邓铭江等, 2010; 闫琰和王秀东, 2016; 石先进, 2020)。年均气候与极端气候事件对中亚五国均产生了区域差异性影响(表4、表6), 中亚五国应结合自身的农业发展特点从不同侧重方向应对气候变化, 保障粮食安全。哈萨克斯坦农业种植规模为中亚五国之最, 一方面, 利用地处平原、耕地广阔等优势区位条件积极推动集约化、规模化农业种植, 提升粮食深加工能力, 推动粮食产业发展来弥补气候变化带来的威胁, 促进粮食产业链纵向发展; 另一方面, 充分发挥其在中亚五国中粮食生产“领头羊”的作用, 扩大与周边国家的农业合作、贸易与投资, 积极引进国外先进的农机具、机械化生产技术、农产品加工设备等, 推动粮食生产效率提升, 在满足自身粮食供给的前提下, 积极促进区域粮食贸易良性发展。对于可以实现基本粮食自给的乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和土库曼斯坦来说, 在保障原有粮食生产环境稳定的前提下, 深挖粮食生产潜力, 加强粮食种植精细化耕作, 有效提升耕地资源利用率。同时, 为粮食生产提供充足的资金保障, 完善农业从业人员培训、农业增产补贴等惠农机制, 提高粮食种植户抵御风险能力和粮食生产

积极性。塔吉克斯坦不能实现粮食自给, 主要依赖粮食进口, 需要优先加强本国粮食产业发展。在粮食生产过程中要采取综合配套技术提高抵御自然灾害的能力, 积极引进先进的粮食生产技术与抗旱作物品种, 提升作物对环境变化的适应性, 增强本国粮食供给造血能力。同时还应建立多渠道粮食进口贸易体系, 增强规避粮食进口风险的能力。

4.2 人地系统视角下中亚五国粮食安全的发展路径

从本质上看, 粮食安全研究是人地关系的延伸和深化, 它也是寻求人类发展与资源协调的一种有效途径。在气候变化背景下, 推动人地系统协调发展是保障粮食安全的根本出路, 有助于提高应对气候变化下粮食生产科学研究水平, 为解决中亚五国粮食安全问题奠定坚实基础。在1990~2019年以极端高温、极端低温为代表的极端气候事件导致粮食作物所必需的温度、水分、土壤等生产要素发生变化, 严重破坏了农业生产环境的稳定性, 威胁粮食安全(表5)。根据IPCC AR6第一工作组报告对未来全球气候的预估结果显

示, 未来气候变暖将会对粮食安全产生更加复杂深刻的影响. 因此, 中亚五国应具有前瞻性, 系统地厘清人地发展关系, 考虑农业灌溉、能源消耗及经济发展等需求, 明晰粮食生产、能源保障、生态安全、社会经济发展的调控关键指标及其范围, 结合可持续发展适应情景, 提出粮食安全目标下可持续发展方案和调控对策. 在粮食生产环节, 有规划发展绿色节水农业, 削弱人类活动对农业生产环境的破坏(黄丽和王武林, 2021). 并在坚持充足粮食耕地的基础上, 对耕地进行合理开发, 限制不合理开垦, 适应气候变化背景下的农业种植结构及区域调整(Riccò等, 2018). 同时, 采用技术手段为粮食作物打造适宜的生产环境, 减小气候变化对粮食生产的影响, 例如, 节水灌溉、农业抗旱、工程保水等农业节水技术的研发和应用促使季节性干旱和局部干旱得到有效缓解, 尤其对中亚干旱区粮食产量的提高发挥了极大作用(韩海青等, 2021). 此外, 利用农业监测技术适时调整农业布局 and 结构, 促进未利用地有序开发, 可以有效降低气候变暖对农业生产的负面影响(阮宏威和于静洁, 2019).

4.3 “一带一路”倡议下中亚五国粮食安全的合作机制

中亚五国是“一带一路”沿线重要组成国家, 在全球气候变化背景下, 无论是针对气候变化对粮食安全的影响, 还是针对中亚五国农业现代化水平较低的现状, 都可以积极依托于“一带一路”发展契机得以适应缓解(Zhou等, 2022). 通过利用“一带一路”倡议, 中亚五国可利用优势自然资源禀赋, 积极引进本区域较为匮乏的外资资本、先进技术等要素, 加强粮食贸易, 确立起与中方的粮食合作机制. 例如: 中亚五国土地资源丰富, 人均耕地面积约是中国的6倍, 尚未开垦的农业用地面积较大, 通过引进中资先进农业企业, 既能利用先进管理理念, 推动本国粮食产业链升级, 还可以创造就业, 提升农业产业从业人员收入(黄佩佩和魏凤, 2022). 中亚五国可依托上海合作组织农业基地、“一带一路”精准农业国际合作高端论坛、“一带一路”农业现代化国际合作发展论坛等, 通过分享农业科研成果与技术交流进行粮食新种选育、机械化农具分享及农业领域技术与产业发展合作, 促进“一带一路”沿线国家粮食生产技术共享(谷幸和李煜强, 2022). 此外, 通过“一带一路”贸易, 中亚五国应积极投身多边

贸易规则和磋商机制, 推动本国粮食产业链资源高效配置、市场深度融合(余燕等, 2021).

5 结论与展望

基于1990~2019年数据, 发现过去30年气候变化对中亚五国粮食安全有显著影响, 年均温度和降水与中亚五国粮食安全存在倒U型关系, 极端高温和极端低温对中亚五国粮食安全具有显著的负向影响. 模型预测结果显示2030~2090年中亚地区气温和降水量都处于上升状态, 将会对中亚五国粮食安全有持续负面影响. 各国应提高对气候风险的认识, 加强气候变化对农业领域影响的科学系统研究, 制定多方面的适应策略. 同时, 加强国际合作, 通过采取公平、公正的气候行动, 保障充足的资金、技术转让、政治承诺和伙伴关系, 从而更有效地适应气候变化并减少温室气体排放, 强化保障粮食安全的能力. 未来需进一步加强对国际及重点区域粮食安全的战略研究, 把地区粮食安全放在全球粮食安全评价体系中进行综合对比, 有针对性地制定不同国家和地区的差异性粮食安全保障战略.

参考文献

- 陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 王尧, 陈琼. 2021. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. 生态学报, 41: 2918–2929
- 丑洁明, 董文杰, 徐洪, 涂钢. 2022. 气候变化影响中国粮食安全研究的新思路. 气候与环境研究, 27: 206–216
- 崔明明, 聂常虹. 2019. 基于指标评价体系的我国粮食安全演变研究. 中国科学院院刊, 34: 910–919
- 邓铭江, 龙爱华, 章毅, 李湘权, 雷雨. 2010. 中亚五国水资源及其开发利用评价. 地球科学进展, 25: 1347–1356
- 董婉璐, 杨军, 程申, 李明. 2014. 美国农业保险和农产品期货对农民收入的保障作用——以2012年美国玉米遭受旱灾为例. 中国农村经济, 9: 82–86, 96
- 樊胜根, 张玉梅, 陈志钢. 2019. 逆全球化和全球粮食安全思考. 农业经济问题, 3: 4–10
- 公茂刚, 王学真. 2017. 中国粮食安全现状的多维度衡量. 新疆社会科学, 6: 29–37, 179
- 谷幸, 李煜强. 2022. 上合组织农业基地让世界“共飨”农科成果. 农业科技报
- 韩芳玉, 张俊飏, 程琳琳, 童庆蒙, 刘勇. 2019. 气候变化对中国水稻产量及其区域差异性的影响. 生态与农村环境学报, 35: 283–289

- 韩海青, 王旭红, 牛林芝, 梁秀娟, 蒋晓辉, 谭竹婷. 2021. 1992~2015年中亚五国LUCC特征及耕地驱动力研究. 中国生态农业学报(中英文), 29: 325–339
- 胡岳岷, 刘元胜. 2013. 中国粮食安全: 价值维度与战略选择. 经济学家, 5: 50–56
- 黄丽, 王武林. 2021. 中亚五国粮食生产水足迹及水消耗量预测. 经济地理, 41: 118–126
- 黄佩佩, 魏凤. 2022. “一带一路”沿线国家粮食全要素生产率时空演变及驱动因素. 世界农业, 5: 5–15
- 李满春, 杜聪, 姜朋辉, 栾文博, 陈登帅. 2023. 土地系统演变与气候变化耦合的中国未来水稻潜在产量模拟研究. 中国科学: 地球科学, 53: 1795–1807
- 李腾飞, 亢霞. 2016. “十三五”时期中国粮食安全的重新审视与体系建构. 农业现代化研究, 37: 657–662
- 李睿思. 2022. 疫情背景下中亚国家经济形势与“一带一路”合作. 商业研究, 1: 67–75
- 欧阳竹, 邓祥征, 孙志刚, 龙花楼, 张林秀, 李发东, 金贵. 2020. 面向国民经济主战场的区域农业研究. 地理学报, 75: 2636–2654
- 庞艳梅, 陈超, 徐富贤, 郭晓艺. 2020. 气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响. 中国生态农业学报(中英文), 28: 1661–1672
- 阮宏威, 于静洁. 2019. 1992~2015年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化. 地理学报, 74: 1292–1304
- 石先进. 2020. “一带一路”框架下中国与中亚五国农业产能合作路径. 云南大学学报(社会科学版), 19: 135–144
- 王钢, 钱龙. 2019. 新中国成立70年来的粮食安全战略: 演变路径和内在逻辑. 中国农村经济, 9: 15–29
- 王志章, 杨珂凡. 2021. 中亚五国贫困陷阱形态刻画及跨越策略研究. 世界农业, 5: 79–88
- 许吟隆, 赵运成, 翟盘茂. 2020. IPCC特别报告SRCCL关于气候变化与粮食安全的新认知与启示. 气候变化研究进展, 16: 37–49
- 闫琰, 王秀东. 2016. “一带一路”背景下我国与中亚五国农业区域合作的重点领域. 经济纵横, 12: 67–72
- 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 张飞, 王飞, 马利刚. 2017. 中亚地区水问题研究综述. 地理学报, 72: 79–93
- 姚成胜, 滕毅, 黄琳. 2015. 中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析. 农业工程学报, 31: 1–10
- 叶明华, 庾国柱. 2015. 要素投入、气候变化与粮食生产——基于双函数模型. 农业技术经济, 11: 4–13
- 余燕, 赵明正, 赵翠萍. 2021. 中国与“一带一路”沿线国家粮食生产合作潜力研究. 区域经济评论, 6: 115–124
- 张宁. 2021. 气候变化或致全球粮食危机. 生态经济, 37: 5–8
- 张强, 姚玉璧, 王莺, 王素萍, 王劲松, 杨金虎, 王静, 李忆平, 尚军林, 李文举. 2017. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策. 生态学报, 37: 7206–7218
- 钟钰, 陈希, 崔奇峰. 2022. 俄乌冲突对世界粮食安全的影响. 世界农业, 10: 18–27
- Brizmohun R. 2019. Impact of climate change on food security of small islands: The case of Mauritius. *Nat Resources Forum*, 43: 154–163
- Chen Y, Li W, Fang G, Li Z. 2017. Review article: Hydrological modeling in glacierized catchments of central Asia—Status and challenges. *Hydrol Earth Syst Sci*, 21: 669–684
- Fusco G. 2022. Climate change and food security in the northern and eastern African Regions: A panel data analysis. *Sustainability*, 14: 12664
- Grace M, Estella Achick T F, Eustace Bonghan B, Evelyn Bih M, Valery Ngo N, James Ajeck M, Tangham Bobyiga Prudence G, Charles Ntungwen F. 2019. An overview of the impact of climate change on pathogens, pest of crops on sustainable food biosecurity. *Iran J Energy Environ*, 4: 114–124
- He H L, Luo G P, Cai P, Hamdi R, Termonia P, De Maeyer P, Kurban A, Li J J. 2021. Assessment of climate change in central Asia from 1980 to 2100 using the Köppen-Geiger climate classification. *Atmosphere*, 12: 123
- Holtermann L. 2020. Precipitation anomalies, economic production, and the role of “first-nature” and “second-nature” geographies: A disaggregated analysis in high-income countries. *Glob Environ Change*, 65: 102167
- Javadi A, Ghahremanzadeh M, Sassi M, Javanbakht O, Hayati B. 2023. Economic evaluation of the climate changes on food security in Iran: Application of CGE model. *Theor Appl Climatol*, 151: 567–585
- Kusainova A A, Mezentseva O V, Tusupbekov Z A. 2020. Influence of precipitation variability and temperature conditions on the yield of grain crops in Northern Kazakhstan. *IOP Conf Ser-Earth Environ Sci*, 548: 042026
- Li S T, Zhang D J, Xie Y, Yang C. 2021. Analysis on the spatio-temporal evolution and influencing factors of China's grain production. *Environ Sci Pollut Res*, 29: 23834–23846
- Liu Y J, Zhang J, Ge Q S. 2020. The optimization of wheat yield through adaptive crop management in a changing climate: Evidence from China. *J Sci Food Agric*, 101: 3644–3653
- Ma C K, Sun L, Liu S, Shao M A, Luo Y. 2015. Impact of climate change on the streamflow in the glacierized Chu River Basin, Central Asia. *J Arid Land*, 7: 501–513
- Mirón I J, Linares C, Díaz J. 2023. The influence of climate change on food production and food safety. *Environ Res*, 216: 114674
- Mirzabaev A, Bezner Kerr R, Hasegawa T, Pradhan P, Wreford A, von der Pahlen M C T, Gurney-Smith H. 2023. Severe climate change risks to food security and nutrition. *Clim Risk Manage*, 39: 100473
- Mishra P. 2020. Impact of climate change on Indian Agriculture: Some recent evidence. *Asian J Res Soc Sci Humanities*, 10: 35–40

- Rehman A, Ma H, Ahmad M, Ozturk I, Chishti M Z. 2021. How do climatic change, cereal crops and livestock production interact with carbon emissions? Updated evidence from China. *Environ Sci Pollut Res*, 28: 30702–30713
- Riccò M, Vezzosi L, Gualerzi G. 2018. Health and safety of pesticide applicators in a high income agricultural setting: A knowledge, attitude, practice, and toxicity study from North-Eastern Italy. *J Prev Med Hyg*, 59: E200–E211
- Smith G R, Archer R. 2020. Climate, population, food security: Adapting and evolving in times of global change. *Int J Sustain Dev World Ecol*, 27: 419–423
- Sun Z L, Zhang D F. 2021. Impact of trade openness on food security: Evidence from panel data for Central Asian Countries. *Foods*, 10: 3012
- Wang T Q, Huang L J. 2018. An empirical study on the relationship between agricultural science and technology input and agricultural economic growth based on E-Commerce Model. *Sustainability*, 10: 4465
- Yang Q, Zheng J Z, Zhu H C. 2020. Influence of spatiotemporal change of temperature and rainfall on major grain yields in southern Jiangsu Province, China. *Glob Ecol Conservation*, 21: e00818
- Yu C Z, Miao R Q, Khanna M. 2021. Maladaptation of U.S. corn and soybeans to a changing climate. *Sci Rep*, 11: 12351
- Zhao Y M, Qian C, Zhang W J, He D, Qi Y J. 2021. Extreme temperature indices in Eurasia in a CMIP6 multi-model ensemble: Evaluation and projection. *Intl J Climatol*, 41: 5368–5385
- Zhang X H, Yu X H. 2021. Short supply chain participation, and agrochemicals' use intensity and efficiency: Evidence from vegetable farms in China. *China Agricult Econom Rev*, 13: 721–735
- Zhou L Z, Tong G J, Qi J G, He L. 2022. China and countries along the “Belt and Road”: Agricultural trade volatility decomposition and food security. *Agriculture*, 12: 1850

(责任编辑: 陈建徽)