西南边境地区气候风险对耕地多功能性的影响

杨昌明[1], 农秀绣[2]
(1.百色市农业农村项目和农田规划建设服务站,
广西 百色 533000; 2.百色市自然资源服务中心, 广西 百色 533000)

摘　要: [目的]分析气候风险对西南边境地区耕地多功能性的时空影响特征及其作用机制,为气候变化背景下的边境地区土地可持续利用提供科学依据。[方法]以中国西南边境地区为研究区,构建涵盖干旱、雨涝和高温、低温的气候风险指数,建立经济生产、社会生活和生态环境三维耕地多功能评价体系,分析2008—2023年气候风险与耕地多功能性的时空演变特征,并采用面板向量自回归(PVAR)模型识别气候风险对耕地多功能性的动态影响及作用机制。[结果]①气候风险总体呈"稳步上升,后期趋稳"的演变趋势,空间格局表现为"西高东低,南强北弱",2018年后局部地区有所改善;②耕地多功能整体提升但维度节奏差异明显,经济功能呈"波动上升",社会功能表现为"稳步上升后趋缓",生态功能则为"波动上升且稳定性较强",综合功能由早期的"功能冲突"逐步转向"协同发展",并形成"广西百色-崇左、云南红河-西双版纳"双核心格局;③气候风险对耕地各维度功能均产生显著短期负向冲击,生态功能表现为"先降后稳";方差分解结果表明,气候风险在第10期对经济、社会、生态和综合功能的贡献率分别达到5.46%,3.85%,3.80%和5.28%。[结论]气候风险显著削弱西南边境地区耕地多功能表现,特别是在经济与社会维度;生态功能相对具有恢复韧性。

关键词: 气候风险; 耕地多功能; 面板向量自回归; 脉冲响应; 中国西南边境
文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2026)04-0421-12　　**中图分类号:** Q948.112, X173

文献参数: 杨昌明, 农秀绣.西南边境地区气候风险对耕地多功能性的影响[J].水土保持通报,2026,46(4):421-432. Yang Changming, Nong Xiuxiu. Impact of climate risk on farmland multifunctionality in southwest border region of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):421-432.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.013　　**CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.013**

Impact of climate risk on farmland multifunctionality in southwest border region of China

Yang Changming[1], Nong Xiuxiu[2]
(1.*Baise Agricultural and Rural Projects and Farmland Planning and Construction Service Station*, *Baise*, *Guangxi* 533000, *China*; 2.*Baise Natural Resources Service Center*, *Baise*, *Guangxi* 533000, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal characteristics and mechanisms of the impact of climate risk on farmland multifunctionality in the southwest border region of China were analyzed in order to provide a scientific basis for the sustainable land use of border regions under climate change. [Methods] Taking the southwest border region of China as the study area, a climate risk index encompassing drought, flood, high temperature and low-temperature was constructed. A three-dimensional evaluation framework of farmland multifunctionality covering economic production, social livelihood, and ecological environment was developed to analyze the spatiotemporal evolution characteristics of climate risk and farmland multifunctionality from 2008 to 2023. Furthermore, a panel vector autoregression (PVAR) model was employed to identify the dynamic effects and underlying mechanisms of climate risk on farmland multifunctionality. [Results] ① Climate risk showed an overall trend of steady increase followed by stabilization, with a spatial pattern characterized by high values in the west and low values in the east, and stronger effects in the south than in the north. Some local areas showed improvement after 2018. ② Farmland

收稿日期:2025-09-25　　**修回日期:**2025-11-29　　**采用日期:**2025-11-29
第一作者:杨昌明(1993—),男(苗族),广西壮族自治区隆林各族自治县人,硕士,中级农艺师,研究方向为农业资源与环境。Email:1163643968@qq.com。
通信作者:农秀绣(1995—),女(壮族),广西壮族自治区德保县人,土地工程与技术中级工程师,研究方向为耕地保护与利用。Email:793018316@qq.com。

multifunctionality improved overall, but its evolutionary rhythms differed markedly across dimensions. The economic function showed a fluctuating increase, the social function showed steady growth followed by deceleration, and the ecological function showed a fluctuating increase with relatively strong stability. The comprehensive function gradually shifted from early "functional conflict" to "coordinated development", forming a dual-core pattern of Baise-Chongzuo in Guangxi and Honghe-Xishuangbanna in Yunnan. ③ Climate risk exerted significant short-term negative shocks on all farmland functional dimensions, and the ecological function showed a decline followed by stabilization. Variance decomposition results indicated that by the 10th period, the contribution rates of climate risk to the economic, social, ecological and comprehensive functions reached 5.46%, 3.85%, 3.80% and 5.28%, respectively. [Conclusion] Climate risk significantly weakens farmland multifunctionality in the southwest border region, especially in the economic and social dimensions, while the ecological function shows relatively strong resilience.

Keywords: climate risk; farmland multifunctionality; panel vector autoregression; impulse response; southwest border region of China

气候风险是指在全球气候系统持续变暖与异常波动背景下,由极端气候事件频发所引致的不确定性与潜在损失,集中反映自然环境与人类社会在气候变化中的暴露程度、敏感性与适应能力[1-2]。近几十年来,全球变暖趋势不断强化,干旱、洪涝与高温等极端事件呈高频并发态势,对粮食安全、生态安全与区域可持续发展构成复合性挑战[3-4]。《巴黎协定》和《2030年可持续发展议程》均强调,通过提升农业生态系统的韧性与适应能力,可促进人地系统的协调与长期稳定[5-6]。因此,气候风险研究已成为全球变化科学与人地关系地理学的重要交汇领域,其核心任务在于揭示气候扰动-土地系统响应-区域可持续性之间的动态耦合机制。耕地作为中国粮食安全与生态安全的核心空间载体,城市扩张、资源约束与气候变异叠加,导致耕地数量持续减少、质量退化与生产风险上升,呈现出"数量-质量-生态"三重压力格局[7],尤其在中西部地形破碎,生态脆弱,基础设施薄弱的西南边境地区,对气候扰动的暴露度与敏感性显著更高[8-9]。气候风险已成为制约区域农业稳定与生态安全的重要外生变量,其综合影响表现为农业产出波动、生态系统退化与农村生计脆弱性的同步加剧。因而,在气候变化背景下如何统筹提升耕地的经济生产、社会保障与生态调节功能,已成为地理学、土地科学与可持续发展研究共同关注的核心科学命题与政策焦点。

关于气候风险与耕地利用关系的研究不断深化,研究内容与方法体系逐渐从单一要素分析走向综合集成。一方面,从研究视角看,学界已由传统的自然地理或气候学视角转向跨学科综合研究,涵盖气候灾害识别、农业产出波动、生态系统响应等多领域内容,形成了地理学、生态学与经济学相互融合的整体性研究格局[10-11]。另一方面,在指标体系构建上,气候风险评估多采用灾害频率统计、遥感模拟与综合风险指数等方法,耕地多功能测度则普遍基于经济产出、社会保障与生态服务等多维指标体系,反映出人地系统中"生产-生活-生态"功能的交互特征[12-13]。

在作用机制方面,现有研究逐步从关注气候风险对农业产出的直接影响,拓展至其通过社会和生态通道产生的间接效应,但对于多功能间的联动机制与系统性风险放大过程的探讨仍显不足[10,14]。空间上,学者普遍认为气候风险对耕地多功能的影响具有显著地域差异,这不仅取决于自然禀赋与气候条件,也受社会经济基础与政策干预程度的共同作用[12,15]。方法上,尽管统计回归、情景模拟和地理探测器等方法在揭示气候风险与土地利用的相关性方面发挥了重要作用,但在刻画动态效应、识别因果机制以及揭示时空演化规律方面仍显局限[13,16]。总体来看,现有研究为理解气候风险与耕地多功能关系提供了重要启示,但在区域覆盖、功能耦合机制与动态识别路径等方面仍有待深化。

西南边境地区作为生态脆弱、气候扰动频发且兼具安全与生态屏障功能的典型区域,其耕地系统的多功能响应特征对深化人地关系理论具有重要意义。该区域地貌类型复杂、气候梯度显著,能够典型反映气候风险作用下人地关系格局的多样性与复杂性[17],同时在国家粮食安全与生态安全格局中具有战略地位,使研究结论更具代表性与政策参考价值。基于此,本文选取中国西南边境地区为研究区,初步梳理了气候风险与耕地功能间的影响机理,构建涵盖经济生产、社会生活和生态环境三维度的耕地多功能评价体系,刻画2008—2023年气候风险与耕地多功能的阶段性演变与空间分异特征,揭示不同功能在气候扰动下的动态响应过程与区域差异。同

时,进一步采用面板向量自回归(PVAR)模型识别气候风险的短期冲击效应与中长期累积影响,分析其在多功能系统中的传导路径与放大机制。本研究旨在深化对气候变化背景下人地关系系统复杂性的认识,为边境地区耕地保护、粮食安全与可持续发展提供经验证据与科学支撑。

1　理论框架

气候系统是农业系统运行的基本外部约束,极端高温、强降水、干旱和低温冻结等事件通过影响土壤水分、作物生长过程与水热条件,直接决定耕地产能与土地利用稳定性[18-20]。耕地作为人地关系地域系统的核心空间载体,既承担粮食供给、社会保障与生态调节等多重功能,其发挥效果又高度依赖区域气候条件与自然禀赋[11,21]。在生态脆弱、基础薄弱的西南边境地区,气候扰动的频次与强度放大了系统暴露度与敏感性,使耕地功能呈现显著时空异质性与累积性冲击。因此,构建起反映气候风险—耕地系统双向作用关系的理论框架以揭示其作用机理与动态路径极为重要(图1)。

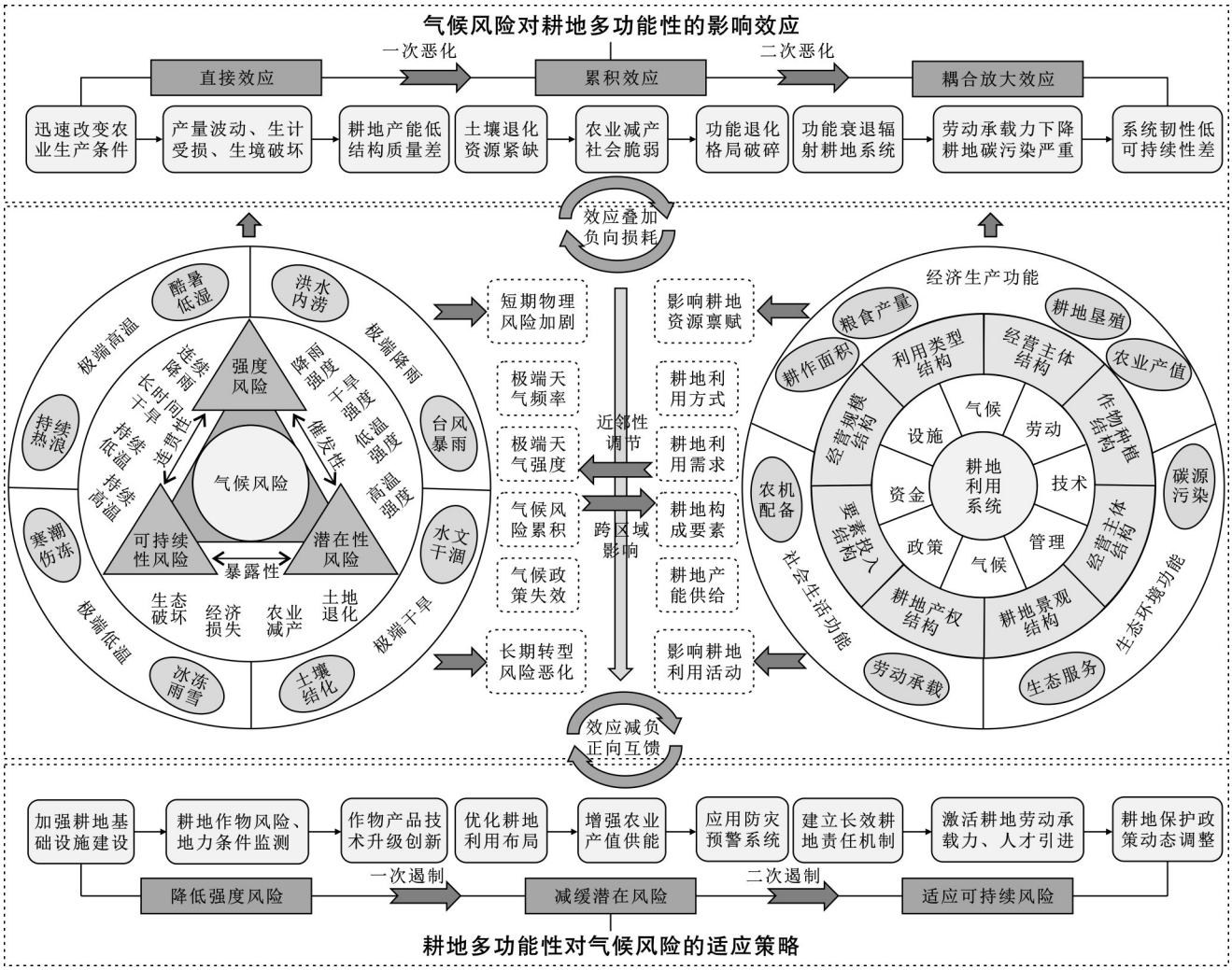


图1　气候风险对耕地多功能性的影响机制

Fig.1　Impact mechanism of climate risk on farmland multifunctionality

气候风险形成于极端气候事件的频率、强度及其累积效应,其影响路径可大体归结为3个层面:即时冲击、阶段累积与长期持续性效应。即时冲击主要表现为高温热害、强降水洪涝、干旱等对耕作环境的直接破坏;阶段累积则体现在土壤侵蚀、地力衰退、作物生理障碍等渐进性损伤;长期持续性风险则通过改变生态服务供给、水文过程与土地质量,影响耕地系统长期生产能力与生态稳定性。耕地系统在经济生产、社会生活与生态环境3个维度上对上述风险表现出显著差异的敏感性——经济功能受生产条件扰动最直接,社会功能受劳动力供给与生计稳定性制约,生态功能则更多体现为自然过程的缓冲与修复能力。

气候系统与耕地多功能性之间并非单向关系,

而是典型的“气候—土地—社会”耦合反馈机制。气候扰动通过水文、土壤与生物过程改变耕地利用方式与功能结构，而耕地的利用格局、植被覆盖度、农业管理措施等又能通过影响地表反照率、蒸散发与水循环，对区域气候风险的暴露程度产生反馈作用[22-23]。这一双向过程具有近邻调节与跨区域传导的双重特征，决定了气候风险在系统中的传播模式与功能间的联动关系。基于人地关系地域系统理论，本研究将气候风险影响耕地多功能的机制概括为“直接效应—累积效应—耦合放大”三阶段传导逻辑。直接效应主要通过破坏生产条件，引发产量下降、生境退化与社会脆弱性提升[24-25]；累积效应则通过质量退化、水分亏缺与资源压力形成衍生性风险[22,26]；耦合放大效应体现为多维功能之间的负向联动，例如经济功能下降导致社会功能承载能力弱化，继而影响生态管理投入，最终形成系统性退化[21,27]。

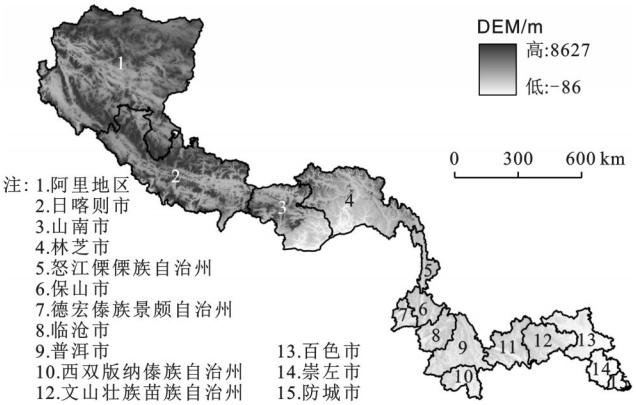
在适应路径上，耕地多功能通常遵循“降低强度风险—减缓潜在风险—适应持续性风险”的递阶逻辑。短期适应侧重于农田基础设施建设、防灾减灾工程与作物管理调控；中期应对着重于优化耕作制度、调整作物结构与增强农业系统韧性；长期适应则依托制度安排、生态修复与用途管制等方式强化系统韧性，形成政策、资金与生态过程之间的正向反馈循环。据此，本研究通过构建气候风险与耕地多功能的耦合机制框架，旨在揭示气候扰动在经济、社会与生态功能维度的传导路径及其系统性放大规律，为后续实证分析提供理论支撑。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区概况与数据来源

本研究选取广西、云南和西藏三省（区）的边境地级市作为研究区域（图2）。该区域位于中国西南边疆，地形复杂，以山地、高原和河谷为主要地貌类型，兼具热带、亚热带与高原气候特征。在地形与气候条件的共同作用下，洪涝、干旱和滑坡等气候风险事件频发，农业生产与农村生计易受扰动，生态环境脆弱性突出。2003—2023年西南边境地区生产总值从不足5.00×10^{10}元突破至4.00×10^{11}元，人口数量从2.65×10^{7}人下降至2.42×10^{7}人，人口城镇化率为55.33%，低于全国人口城镇化率8.56%。同时，该区域地处国家“一带一路”建设和中老、中缅、中印等跨境通道的重要节点，不仅是维护国家粮食安全与生态安全的重要屏障，也是国家参与国际合作与区域协调发展的前沿地带，具有典型性和代表性。

数据获取方面，气候风险指标主要来源于中国气象科学数据共享服务平台的逐日气象观测资料，选取降水、气温等关键气候要素，构建2008—2023年气候风险指数。耕地多功能测度涵盖经济生产、社会生活和生态环境3类功能指标，分别取自《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及各地级市统计年鉴和政府公报。社会经济相关数据参照国家统计局和中国社会经济大数据平台，生态环境相关数据则利用自然资源部土地利用数据、遥感监测资料及《中国生态环境状况公报》。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS（2023）2763标准地图制作。底图边界无修改。下同。

图2 西南边境区划及地理概况图

Fig.2 Map of border districts and geographical overview in southwest region of China

2.2 气候风险测度方法

本研究采用Guo Kun[28]等发布的全球气候物理风险数据集（climate physical risk index，CPRI）来表征研究区的气候风险水平。该数据集基于NOAA全球气象站逐日观测数据构建，覆盖1993—2023年，包含170个国家及中国31个省份和229个城市的年度气候风险指标。其核心由4类子指标组成：极端低温日数（LTD）、极端高温日数（HTD）、极端降雨日数（ERD）和极端干旱日数（EDD）。首先利用1973—1992年的气象资料确定极端阈值（温度10%/90%，降雨与湿度5%/95%）；随后统计年度极端日数，并通过极差标准化方法进行标准化；最后对4类子指标赋予等权重，计算综合的气候物理风险指数（CPRI）。相较于基于灾害损失的传统风险衡量方式，该数据集具有观测一致性高，时效性强和空间覆盖广的优势。本研究直接选取其中覆盖中国西南边境地级市的2008—2023年数据，用于刻画气候风险的时空演化特征并开展动态效应分析。

2.3 耕地多功能测度方法

耕地多功能是指耕地在经济、社会与生态3个维度所发挥的综合效用。为全面刻画西南边境地区耕

地的多功能水平,本研究在参考既有研究的基础上[13,27,29],结合区域自然禀赋与社会经济特征,构建涵盖经济生产、社会生活与生态环境3类功能的多维评价指标体系(表1)。其中,经济生产功能强调耕地在粮食供给与农产品产出方面的作用;社会生活功能突出耕地对农户就业、生计保障与公共财政支持的承载效应;生态环境功能则反映耕地在维持生态平衡,提供环境服务与调节碳排放中的作用。

表1　西南边境耕地多功能评价指标体系及其权重

Table 1　Evaluation indicator system and weights of farmland multifunctionality in southwest border region

目标层	准则层	指标层	含义解释	属性	权重
耕地多功能性	经济生产功能(EP)	粮食单产	单位耕地的粮食生产效率(粮食产量/耕地面积)	+	0.32
		地均农业产值	单位耕地产生的农业经济效益(农业总产值/耕地面积)	+	0.27
		复种指数	土地利用强度(农作物播种面积/耕地面积)	+	0.23
		农业机械总动力强度	农业生产装备水平(农业机械总动力/耕地面积)	+	0.18
	社会生活功能(SL)	人均粮食产量	反映区域粮食生产对居民基本生活保障的支撑能力(粮食产量/总人口)	+	0.35
		耕地劳动力承载量	耕地对劳动力的吸纳能力(第一产业从业人数/耕地面积)	+	0.31
		人均耕地面积	拥有耕地资源的禀赋状况(耕地面积/农村人口)	+	0.19
		农业财政支出	第一产业财政支出表征农业发展政策支持力度	+	0.15
	生态环境功能(SE)	高坡耕地占比	坡地耕作难度与生态风险(>25°高坡耕地面积占比)	−	0.30
		农田生态服务价值	耕地生态系统服务供给能力	+	0.38
		农业面源污染	农业活动产生的非点源污染压力	−	0.16
		地均耕地碳排放	耕地利用过程中的温室气体排放强度(农业碳排放量/耕地面积)	−	0.16

注:表中"+"表示正向指标;"−"表示负向指标。

2.4　面板向量自回归模型(PVAR)

为刻画气候风险与耕地多功能之间的动态互动关系,本研究引入面板向量自回归模型(panel vector autoregression, PVAR)。该模型能够同时考虑变量之间的双向因果关系和动态效应,避免了传统单方程模型中因果设定的局限性,适用于探讨气候风险对耕地多功能在不同时滞下的冲击效应与累积影响[30]。PVAR模型的基本形式为:

$$Y_{it}=A_0+\sum_{p=1}^{P}A_pY_{i,t-p}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中,Y_{it}为包含气候风险指数(CRI)、经济生产功能(EP)、社会生活功能(SL)、生态环境功能(SE)和综合功能(MF)在内的内生变量向量;A_0为截距向量;A_p为待估系数矩阵;p表示滞后阶数;μ_i表示个体固定效应,λ_t表示时间效应,ε_{it}为随机扰动项。

同时,本研究采用系统广义矩估计,以克服潜在内生性问题并提高参数估计的有效性。首先对估计结果进行稳定性检验,所有特征根位于单位圆内,表明模型设定稳健,进一步利用脉冲响应函数刻画气候风险冲击对耕地多功能的动态效应路径,最后通过方差分解量化气候风险对不同维度功能波动的贡献率,从而揭示其短期冲击效应与中长期累积影响。

3　结果与分析

3.1　西南边境地区气候风险的时空特征

2008—2023年西南边境地区气候风险整体呈现"稳步上升,后期趋稳"的态势。箱型图结果显示,气候风险中位数由2008年的0.45升至2018年的0.50,2023年虽有所波动但仍维持在较高水平(图3a),表明区域气候风险在长期尺度上总体增强。核密度曲线进一步揭示,风险分布峰值由2008年的0.40附近右移至2018年的0.50(图3b),反映高风险区域比重逐渐增加;2023年峰值位置略有回落且尾部收窄,风险扩张态势有所缓和,整体进入相对稳定阶段。四分位距与离群点的变化揭示了区域差异的动态演化:2008年风险分布较集中,差异较小;2013—2018年区间显著扩大,离群点增多,空间分化加剧;2023年区间收窄,区域差异趋于缓和,这与农田水利建设和生态修复等适应性措施的实施密切相关。

本文采用自然断点法对气候风险指数进行分级。自然断点法能够依据数据的内在分布特征自动确定最佳分割点,已在国际土地利用、生态环境与风险研究中广泛应用,适用于本区非正态分布、空间异质性强的指标特征。

由图4空间分布格局可知,气候风险整体呈现"西高东低,南强北弱"的格局,并表现出显著的空间集聚性。高风险区集中在云南西部的怒江、保山及南部的西双版纳与广西崇左等地,这些地区地形破碎、山高谷深,降水集中且强度大,洪涝、滑坡等灾害频发,加之水利设施薄弱,适应能力不足。低风险区主要分布在广西百色河谷、云南文山及红河河谷平原等地,地势较为平缓,降水分布均衡,农业基础设

施条件较好，具备一定的风险抵御能力。空间动态演变显示，2008—2018年高风险区呈现“西扩南延”的趋势，怒江流域风险持续增强，西双版纳风险向周边县域扩展；2018—2023年扩张态势有所减缓，部分地区如保山南部风险值由0.59降至0.43，局地改善明显，与退耕还林、生态修复和灾害防治工程的推进密切相关。市域尺度的量化结果进一步表明，防城港市2023年风险值高达0.88，属于研究区极端高风险区；红河哈尼族彝族自治州、文山壮族苗族自治州风险值长期维持在0.50以上，气候风险压力持续偏大；保山市风险值在2018—2023年显著下降，表明区域间差异突出，且气候适应性政策初见成效。

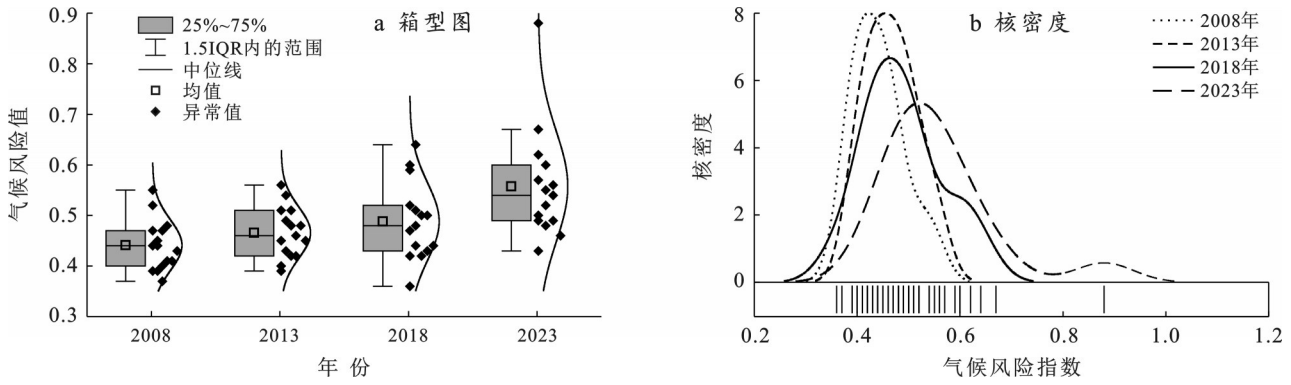


图3 2008—2023年西南边境气候风险值的箱型图和核密度图

Fig.3 Boxplot and kernel density plot of climate risk values in southwest border region (2008—2023)

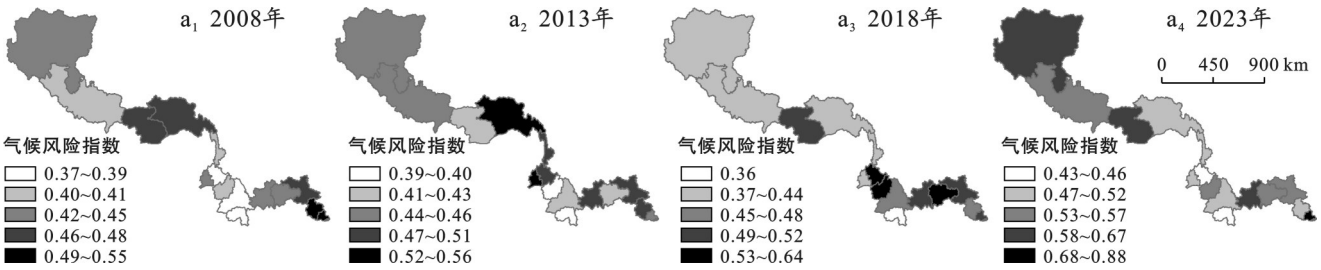


图4 2008—2023年西南边境地区气候风险空间分布

Fig.4 Spatial distribution of climate risk in southwest border region (2008—2023)

3.2 西南边境地区耕地多功能的时空演变规律

图5展示了耕地多功能指数的空间分布，其分级方法与图4一致，均采用自然断点法，使功能空间格局能够依据指标自身分布特征实现最优划分。基于2008—2023年西南边境15个地级市（州）的耕地多功能指数可以看出，经济生产、社会生活、生态环境及综合功能总体呈现“缓慢改善，阶段波动”的共同特征，但各功能的变化幅度与动力机制并不一致，不同区域之间也存在显著的空间差异。

经济生产功能表现为“波动中缓升”。区域平均值由2008年的约0.36在2013年降至约0.30，这一时期的下降与2010年西南地区发生旱灾事件有关，多个地区（如普洱、保山）经济功能明显回落。进入2013—2018年，受特色农业扩张，农业投入增加等因素影响，经济生产功能回升至0.36；2023年进一步升至0.39，但整体提升幅度有限，反映了该区域农业增长的阶段性与对极端气候的敏感性。空间格局从早期的零散分布逐渐出现相对稳定的优势区，主要集中在广西百色-崇左及云南红河-西双版纳等地，而怒江、迪庆、林芝等高山峡谷地区因耕地质量有限、受自然条件约束，经济生产功能长期偏弱。

社会生活功能在研究期内呈小幅波动特征，而非持续显著提升。区域平均值由2008年的约0.41变化至2013年仍为约0.41，2018年升至约0.43，但至2023年降至约0.38，为3类功能中唯一出现末期下降的功能类型。数据表明，文山、普洱、德宏等地2023年社会功能均有所回落，这与农村劳动力持续外流、农业就业吸纳能力下降密切相关。空间格局上，高值区主要位于崇左、红河等农业基础较好、人口规模较大的地区，而青藏高原及高山峡谷区（林芝、日喀则、山南）长期处于低值区，区域差异稳定存在。

生态环境功能在研究期内整体呈“波动—恢复—再微降”的过程。区域均值在2008年与2013年均约为0.40，2018年升至约0.43，主要得益于退耕还林、天然林保护以及面源污染治理等工程的持续实施。至2023年均值略回落至约0.39，部分地区出现

小幅下降,表明退耕空间收缩后生态功能提升进入平台期,同时部分区域农业强度上升带来一定生态压力。空间上,普洱、西双版纳、保山等森林覆盖率高、生态资源丰富的地区长期保持高值,而怒江、迪庆等坡耕地广、生态敏感性强的地区则持续处于低值状态。

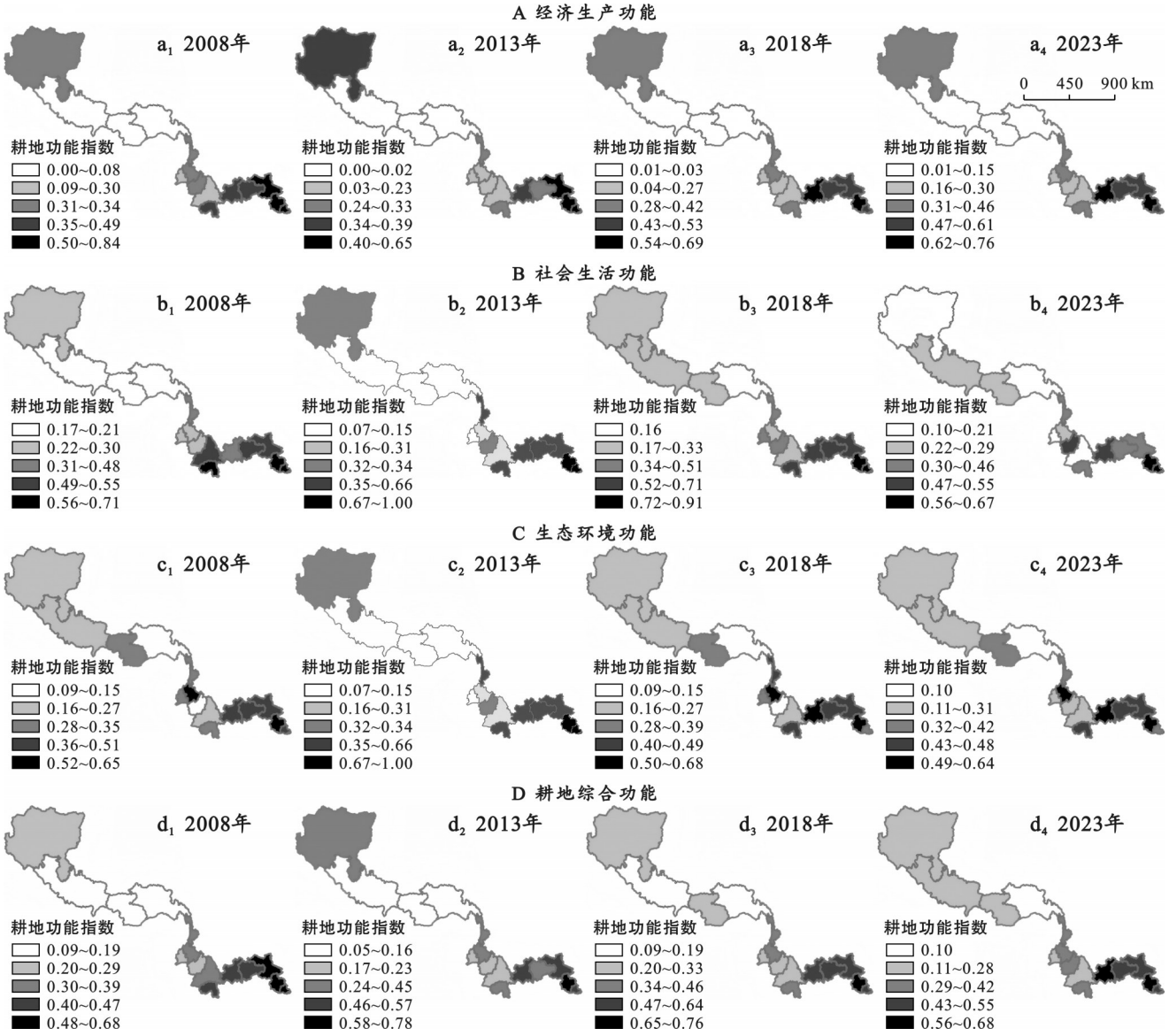


图 5　2008—2023 年西南边境地区耕地多功能指数的空间分布特征

Fig.5　Spatial distribution characteristics of farmland multifunctionality indexes in southwest border region (2008—2023)

综合功能作为3类功能的综合结果,其变化过程总体呈现小幅波动,但未形成持续上升趋势。区域平均值由 2008 年的约 0.39 降至 2013 年的约 0.36,2018 年恢复至约 0.38,2023 年略降至约 0.37。数据清晰表明,综合功能在末期并未继续提升,而是与社会功能的下降同步出现小幅回落,说明经济与生态恢复并未完全弥补社会功能弱化带来的影响。从空间变化看,综合功能的高值区域逐渐由单一的崇左扩展为“百色-崇左”和“红河-西双版纳”两条带状分布,而高山峡谷区(怒江、迪庆、林芝-日喀则)则持续处于低值区,空间分异格局较为稳定。

3.3　西南边境地区气候风险对耕地多功能的影响

3.3.1　稳定性检验

ADF 平稳性检验结果显示,气候风险、经济生产、社会生活、生态环境及综合功能序列均在 1% 显著性水平下平稳(表 2),满足面板向量自回归(PVAR)模型的建模要求。进一步的模型稳定性检验表明,所有特征根均位于单位圆内(图 6),说明模型设定合理。

3.3.2　脉冲响应函数

脉冲响应结果显示,气候风险对耕地多功能的影响均表现为显著的短期负向冲击,并在随后快速

衰减(图7)。4类功能均在第1期出现最大幅度的下降,随后在第2—4期迅速收敛,约第5期后趋于稳定,说明气候因素是耕地多功能波动的重要短期扰动源。经济生产功能的下降幅度最大,初期冲击最为明显,之后呈快速回落趋势。社会生活功能亦在第1期出现负向响应,但其衰减速度略快,约第3期后已接近稳定。生态环境功能的冲击幅度相对较小,在第1期下降后很快趋稳,整体波动较弱。综合功能的响应路径与经济生产功能接近,初期下降明显,随后逐步收敛至零附近。

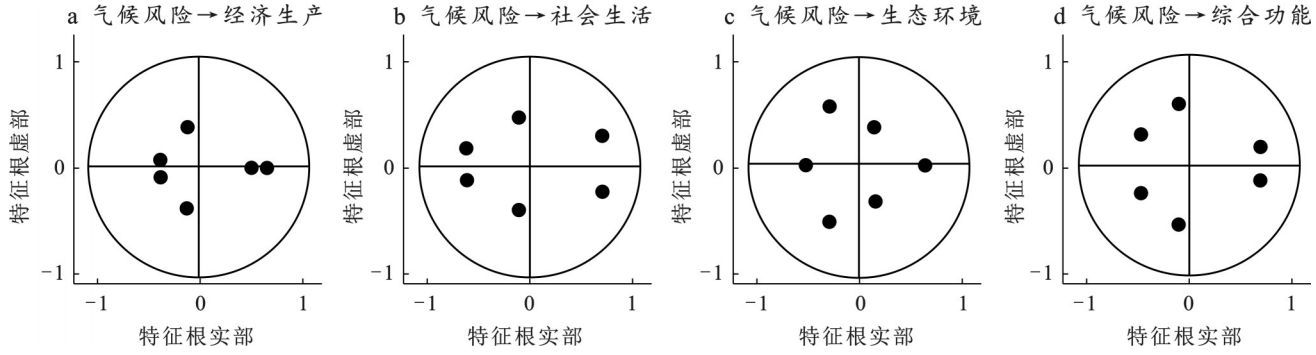
总体而言,气候风险对经济生产功能影响最为明显,对社会生活和生态环境功能的短期冲击较为和缓,综合功能的变化主要反映了经济维度的响应特征。

表2 西南边境地区气候风险对耕地多功能性影响的ADF检验

Table 2 Augmented Dickey-Fuller test of impact of climate risks in southwest border region on multifunctionality of farmland

变量	t	P	结论	临界值		
				1%	5%	10%
气候风险	−6.273	0.000***	平稳	−3.546	−2.912	−2.594
经济生产	−5.113	0.000***	平稳	−3.566	−2.92	−2.598
社会生活	−4.410	0.000***	平稳	−3.568	−2.921	−2.599
生态环境	−5.667	0.000***	平稳	−3.575	−2.924	−2.600
综合功能	−6.903	0.000***	平稳	−3.571	−2.923	−2.599

注:***代表1%的显著性水平。



注:图中所有特征根均落在单位圆内,证明模型通过平稳性检验,结果可靠。

图6 西南边境地区气候风险对耕地多功能性影响的模型稳定性检验

Fig.6 Model stability test of impact of climate risks in southwest border region on multifunctionality of farmland

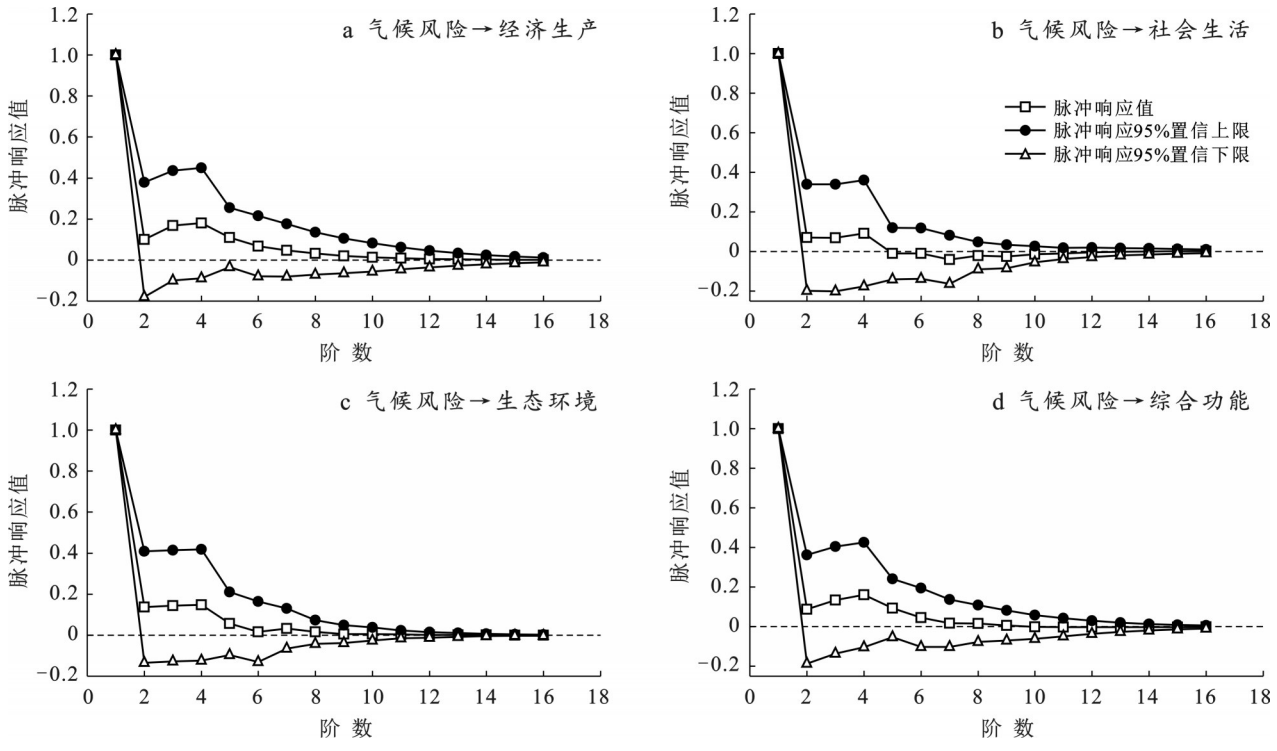


图7 西南边境地区气候风险对耕地多功能性影响的脉冲响应分析

Fig.7 Impulse response analysis of impact of climate risks in southwest border region on multifunctionality of farmland

3.3.3　方差分解

方差分解结果揭示了气候风险对耕地多功能波动的动态影响(表3)。总体来看,随着预测期延长,4类功能的气候风险解释力均呈缓慢上升趋势,但幅度有限,说明西南边境地区耕地系统在短期内对气候冲击具有一定缓冲能力,而中长期仍面临累积性扰动。

经济生产功能初期完全由自身因素主导(第1期解释力为0%),随后气候风险的解释力逐步上升至第10期的5.46%。这一比例虽不高,但显示中长期气候扰动仍会通过影响水热条件、作物生长周期和农田设施运行,对区域农业生产产生持续影响,尤其在干旱年份和暴雨年份影响更为明显。

表3　气候风险冲击对耕地各功能波动的方差贡献率

Table 3　Variance contribution rates of climate risk shocks to fluctuations in each function of farmland

阶数	气候风险冲击对耕地各功能波动的方差贡献率/%							
	经济生产		社会生活		生态环境		综合功能	
	气候风险	经济生产	气候风险	社会生活	气候风险	生态环境	气候风险	综合功能
1	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00
2	99.71	0.30	98.85	1.15	97.34	2.66	98.53	1.47
3	97.43	2.57	97.48	2.52	96.49	3.51	96.70	3.30
4	95.70	4.30	96.76	3.24	96.26	3.74	95.63	4.37
5	94.91	5.09	96.39	3.61	96.22	3.78	95.11	4.89
6	94.65	5.35	96.24	3.76	96.21	3.79	94.88	5.12
7	94.57	5.43	96.18	3.82	96.21	3.79	94.78	5.22
8	94.55	5.45	96.16	3.84	96.21	3.79	94.74	5.26
9	94.54	5.46	96.16	3.84	96.16	3.84	94.73	5.27
10	94.54	5.46	96.16	3.85	96.21	3.80	94.72	5.28

社会生活功能的气候风险解释力在第10期达到3.85%,低于经济生产功能。说明社会生活功能对短期气候冲击具有一定韧性,但仍受农业产出、就业变化、财政支出波动等途径的间接影响。较低的解释力表明社会功能受气候冲击的传导过程存在明显滞后,需要更长时间通过收入、劳动力流动与农村公共服务等渠道逐步显现。

生态环境功能的解释力在第10期为3.80%,同样处于较低水平,反映生态系统在短期冲击后能够通过自然恢复、森林植被调节与水土保持措施实现部分缓冲。然而,气候极端变化对生态功能的持续制约在中长期仍然存在,如水分亏缺影响土壤肥力、极端降雨加剧坡耕地侵蚀等,解释力虽不高但具有持续性。

综合功能在第10期的气候风险解释力为5.28%,整体趋势与经济生产功能最为接近,表明经济生产仍是影响综合系统稳定性的关键环节。由于经济、社会与生态功能之间存在耦合作用,经济功能的波动会进一步传导至综合功能,使系统整体对气候风险的敏感性略高于生态与社会功能。

综合脉冲响应与方差分解结果可进一步概括出西南边境地区的风险传导链:气候冲击首先作用于经济生产功能(直接性最强、解释力最高),随后影响社会生活功能(间接性明显、传导滞后),对生态环境功能的影响相对温和但具有持续性,最后通过功能耦合作用传导至整体的综合功能系统。这表明区域耕地多功能体系在面对气候扰动时具有一定缓冲能力,但长期压力会通过经济与生态渠道不断积累,最终增强综合系统的脆弱性。

4　讨　论

本研究从动态系统视角揭示了气候风险通过“短期冲击—中长期累积—系统耦合放大”的路径影响耕地多功能,其结果与国内外关于极端气候削弱农业产出并通过社会与生态过程传导至土地系统的研究一致[1-4,24]。全球范围内极端事件呈现频率、强度与持续性同步升高,农业系统风险具有复合性、区域性和持续性[1,3]。耕地系统作为人地关系的核心纽带,同时受自然扰动与社会经济过程的双重塑造,其经济、社会与生态功能之间存在显著耦合关系[21,23]。本研究发现,综合功能对气候风险最为敏感,而单一功能在耦合机制下呈现结构性放大效应,反映出土地系统在外部冲击下的非线性响应特征和功能协同的脆弱性。与主产区相比,西南边境地区因地形破碎、基础薄弱和社会脆弱性较高,更易在气候扰动下出现功能错配与区域分化加剧[8,18-20]。

从区域情境看,气候风险在西南边境地区的空间差异不仅源于长期平均风险水平,更与特定地貌单元的暴露度与敏感性密切相关。喀斯特峡谷区具

有“地表河流-地下暗河-上游来水”耦合汇流特征,在短历时强降水背景下极易产生突发性洪涝。研究期内百色河谷等地呈现相对较低的长期平均风险水平,但研究期之外的2025年10月百色洪涝事件在强降雨与上游来水叠加作用下发生,暴露出该区域对极端事件的高度敏感性。该案例说明,基于极端日数构建的气候风险指数更能反映平均态和长期变化,但可能低估喀斯特地区短时强对流及复合灾害的突发性风险。因此,边境地区的未来研究中气候风险治理需同时关注长期趋势与局地极端气候发生过程的双重情景。

治理对策层面,应基于系统韧性的角度统筹经济、社会与生态3类功能。经济上,通过高标准农田建设与灾害指数保险降低极端气候的即时冲击;社会上,通过多元就业、民生保障与迁移调节提升农村社会的恢复力;生态上,通过“工程+自然”的水土保持与生态修复增强系统的缓冲能力[5-6,26]。区域治理需构建县域尺度的多功能协同提升清单,统筹财政、生态补偿与减灾投入,实现跨尺度与跨部门的风险治理协同[7,9,28]。未来研究应进一步引入“暴露-敏感-适应”框架,加强对人口、基础设施与制度因素的综合表征,并耦合作物模型与多主体仿真模拟不同政策场景下的“稳产—生计—生态”权衡路径。此外,应侧重关注气候风险与碳中和政策的协同机制,从区域尺度探索气候适应、功能优化与减排的统筹路径,对实现边境地区的生态安全与可持续发展目标具有重要的现实意义。

5 结 论

(1)气候风险的时空演化具有阶段性与区域性。2008—2023年西南边境地区气候风险总体呈现“稳步上升,后期趋稳”的时间轨迹,空间上形成“西高东低,南强北弱”的格局,并在近年出现局部缓解,表明适应性基础设施建设与生态修复对风险收敛具有显著作用。

(2)研究区耕地多功能整体有所提高,但不同功能子系统演化特征存在差异。经济生产功能受外部气候扰动影响较大,呈现波动性增长;社会生活功能在基础设施与民生投入带动下有所改善,但后期增长趋缓;生态环境功能总体保持稳定提升,但在生态敏感区仍存在滞后。综合功能逐渐从早期的多维度不协调状态转向功能间的相对协调,但区域内仍呈现明显的空间不均衡格局。

(3)气候风险对多功能的动态影响呈现短期冲击与中长期累积并存。脉冲响应结果表明,经济维度受影响最显著,社会维度在受到冲击后出现一定恢复,生态维度在初期下跌后趋于平稳。方差分解显示气候风险的解释力随期数增加,第10期对经济、社会、生态与综合功能的贡献率分别为5.46%,3.85%,3.80%和5.28%,表明其对多功能系统具有持续的滞后效应。

参考文献(References)

[1] Robinson W A. Climate change and extreme weather: A review focusing on the continental United States [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2021,71(10):1186-1209.

[2] Clarke B, Otto F, Stuart-Smith R, et al. Extreme weather impacts of climate change: An attribution perspective [J]. Environmental Research: Climate, 2022,1(1):012001.

[3] 甘黎黎.长江经济带省域农业生态安全与粮食安全耦合协调[J].水土保持通报,2024,44(5):223-233.
Gan Lili. Coupling and coordination of agricultural ecological security and food security in provinces of Yangtze River economic belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):223-233.

[4] Saleem A, Anwar S, Nawaz T, et al. Securing a sustainable future: The climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals [J]. Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences, 2025,11(3):595-611.

[5] Bandyopadhyay S, Maiti S K. Steering restoration of coal mining degraded ecosystem to achieve sustainable development goal-13 (climate action): United Nations decade of ecosystem restoration (2021—2030) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(59):88383-88409.

[6] 张雪花,滑永胜,韩成吉.耕地资源可持续发展的系统动力学仿真分析[J].水土保持通报,2019,39(3):144-150.
Zhang Xuehua, Hua Yongsheng, Han Chengji. System dynamics simulation analysis of sustainable development of cultivated land resource [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(3):144-150.

[7] 张婷,王庆日,陈美球,等.耕地占补平衡新机制:现实困境与实现路径:基于“耕地占补平衡新机制的内在逻辑与实现路径研讨会”的思考[J].中国土地科学,2025,39(7):137-144.
Zhang Ting, Wang Qingri, Chen Meiqiu, et al. New mechanism of balancing cultivated land occupation and reclamation: Practical challenges and implementation pathways: Insights from the seminar on the internal logic and implementation pathways of the new mechanism for balancing cultivated land occupation and reclamation [J]. China Land Science, 2025,39(7):137-144.

[8] 王毅,肖池伟,封志明,等.中越-中老-中缅边境地区土地利用变化的地缘政治经济影响[J].地理学报,2025,80(9):2300-2320.
Wang Yi, Xiao Chiwei, Feng Zhiming, et al. Geopolitical-economic impact on land use change (LUC) in the Chinese borderlands with Vietnam, Laos, and Myanmar [J]. Acta Geographica Sinica, 2025,80(9):2300-2320.

[9] 黄学艺,陆汝成,叶宗达.中国陆地边境地区经济发展质量与生态韧性的耦合测度及交互响应[J].水土保持通报,2024,44(6):256-268.
Huang Xueyi, Lu Rucheng, Ye Zongda. Coupling measurement and interactive response of economic development quality and ecological resilience in China's land border areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(6):256-268.

[10] 许吟隆,赵明月,李阔,等.农业适应气候变化研究进展回顾与展望[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(8):1155-1170.
Xu Yinlong, Zhao Mingyue, Li Kuo, et al. Review on the research progress of agricultural adaptation to climate change and perspectives [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(8):1155-1170.

[11] 吕立刚,撖旭,龙花楼,等.耕地多功能供需匹配研究进展与展望[J].资源科学,2023,45(7):1351-1365.
Lv Ligang, Han Xu, Long Hualou, et al. Research progress and prospects on supply and demand matching of farmland multifunctions [J]. Resources Science, 2023,45(7):1351-1365.

[12] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.中国耕地多功能耦合协调时空演变及其驱动因素[J].农业工程学报,2023,39(7):244-255.
Zhang Yue, Dai Yaqiang, Chen Yuanyuan, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of cultivated land multifunctional coupling coordination development in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(7):244-255.

[13] 臧俊梅,付晓,刘圣祥,等.广东省耕地多功能评价及时空演变分析[J].广东农业科学,2025,52(1):108-123.
Zang Junmei, Fu Xiao, Liu Shengxiang, et al. Multifunctional evaluation and spatio-temporal evolution analysis of cultivated land in Guangdong Province [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2025, 52(1): 108-123.

[14] 王国萍,何思源,闵庆文,等.农户应对气候风险的适应策略研究综述[J].生态与农村环境学报,2022,38(2):137-146.
Wang Guoping, He Siyuan, Min Qingwen, et al. Farmers' Adaptation strategies to climate risk: A review [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022,38(2):137-146.

[15] 原晋涛,陈万旭,曾杰.中国耕地利用变化时空分异特征及对耕地NPP的影响[J].自然资源学报,2023,38(12):3135-3149.
Yuan Jintao, Chen Wanxu, Zeng Jie. Spatio-temporal differentiation of cropland use change and its impact on cropland NPP in China [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(12):3135-3149.

[16] 钟欣秀.湖南省洞庭湖地区耕地多功能演变及影响因素[J].经济地理,2025,45(7):209-217.
Zhong Xinxiu. The evolution and influence factors of cultivated land multifunctionality in the Dongting Lake Region, Hunan Province [J]. Economic Geography, 2025,45(7):209-217.

[17] 顾观海,吴彬,张文主,等.中国陆地边境地区国土空间功能的区域差异及其驱动机制[J].地理研究,2024,43(7):1644-1660.
Gu Guanhai, Wu Bin, Zhang Wenzhu, et al. The regional differences in territorial spatial functions and their driving mechanisms in China's border areas [J]. Geographical Research, 2024,43(7):1644-1660.

[18] 黄晓远,李谢辉.基于CMIP6的西南暴雨洪涝灾害风险未来预估[J].应用气象学报,2022,33(2):231-243.
Huang Xiaoyuan, Li Xiehui. Future projection of rainstorm and flood disaster risk in southwest China based on CMIP6 models [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022,33(2):231-243.

[19] 程艺,刘慧,宋涛,等.人文地理学视域下中国边境地区研究进展与展望[J].地理科学进展,2022,41(10):1940-1955.
Cheng Yi, Liu Hui, Song Tao, et al. Progress and prospect of research on China's border areas from the perspective of human geography [J]. Progress in Geography, 2022,41(10):1940-1955.

[20] 顾观海,龙花楼.中国陆地边境地区地域功能演进及其多维协调格局[J].地理学报,2025,80(10):2810-2829.
Gu Guanhai, Long Hualou. Evolution of territorial functions and multidimensional coordination pattern of China's land border areas [J]. Acta Geographica Sinica, 2025,80(10):2810-2829.

[21] 邱坚坚,刘毅华,袁利,等.人地系统耦合下生态系统服务与人类福祉关系研究进展与展望[J].地理科学进展,2021,40(6):1060-1072.
Qiu Jianjian, Liu Yihua, Yuan Li, et al. Research progress and prospect of the interrelationship between ecosystem services and human well-being in the context of coupled human and natural system [J]. Progress in Geography, 2021,40(6):1060-1072.

[22] 方建,陶凯,牟莎,等.复合极端事件及其危险性评估研究进展[J].地理科学进展,2023,42(3):587-601.
Fang Jian, Tao Kai, Mu Sha, et al. Progress of

research on compound extreme event and hazard assessment [J]. Progress in Geography, 2023,42(3):587-601.

[23] 刘彦随.现代人地关系与人地系统科学[J].地理科学,2020,40(8):1221-1234.
Liu Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science [J]. Geographical Science, 2020,40(8):1221-1234.

[24] 刘苇航,叶涛,史培军,等.气候变化对粮食生产风险的影响研究进展[J].自然灾害学报,2022,31(4):1-11.
Liu Weihang, Ye Tao, Shi Peijun, et al. Advances in the study of climate change impact on crop producing risk [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4): 1-11.

[25] 菅艺伟,付瑾,周丰.极端降水对水稻产量的影响研究综述[J].地理科学进展,2021,40(10):1746-1760.
Jian Yiwei, Fu Jin, Zhou Feng. A review of studies on the impacts of extreme precipitation on rice yields [J]. Progress in Geography, 2021,40(10):1746-1760.

[26] 于贵瑞,李文华,邵明安,等.生态系统科学研究与生态系统管理[J].地理学报,2020,75(12):2620-2635.
Yu Guirui, Li Wenhua, Shao Ming'an, et al. Ecosystem science research and ecosystem management [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(12):2620-2635.

[27] 杨晓帆,刘瑛,蔡海生,等.大南昌都市圈耕地利用的多功能权衡与协同关系演变[J].水土保持通报,2024,44(3):241-251.
Yang Xiaofan, Liu Ying, Cai Haisheng, et al. Evolvement of multifunction balance and synergistic relationship of cultivated land use in Great Nanchang Metropolitan area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):241-251.

[28] Guo Kun, Ji Qiang, Zhang Dayong. A dataset to measure global climate physical risk [J]. Data in Brief, 2024,54:110502.

[29] 余森,马恩朴,季艺雯,等.中国北方典型样带耕地多功能时空演变及其区际耦合[J].自然资源学报,2025,40(2):514-533.
Yu Sen, Ma Enpu, Ji Yiwen, et al. Multifunctional spatiotemporal evolution and its inter-regional coupling of cultivated land in a typical transect in northern China [J]. Journal of Natural Resources, 2025, 40(2): 514-533.

[30] Huber F, Krisztin T, Pfarrhofer M. A Bayesian panel vector autoregression to analyze the impact of climate shocks on high-income economies [J]. The Annals of Applied Statistics, 2023,17(2):1543-1573.

(上接第396页)

[25] 王永祥,徐园园,杨佳嘉,等.基于Landsat的重庆市生态环境质量动态监测及其时空格局演变分析[J].生态学报,2023,43(15):6278-6292.
Wang Yongxiang, Xu Yuanyuan, Yang Jiajia, et al. Dynamic monitoring and spatio-temporal pattern evolution analysis of eco-environmental quality in Chongqing based on remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(15):6278-6292.

[26] 杨佳,斛如媛,赵海平,等.基于XGBoost-SHAP的三峡库区生态屏障区生态系统服务权衡及驱动力分析[J].水土保持学报,2025,39(6):127-138.
Yang Jia, Hu Ruyuan, Zhao Haiping, et al. Analysis of trade-offs and driving forces of ecosystem services in ecological barrier zone of Three Gorges reservoir area based on XGBoost-SHAP model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(6):127-138.

[27] 周瑞娇,张虹,钱敏.近30年三峡库区生态系统服务流时空演变与影响因素研究[J].生态环境学报,2025,34(6):876-887.
Zhou Ruijiao, Zhang Hong, Qian Min. Spatial-temporal evolution of ecosystem service flows in the Three Gorges reservoir area in the past 30 years and influencing factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(6):876-887.

[28] 潘磊,唐万鹏,肖文发,等.三峡库区不同退耕还林模式林地水文效应[J].水土保持通报,2012,32(5):103-106.
Pan Lei, Tang Wanpeng, Xiao Wenfa, et al. Woodland hydrological effects of converting cropland to forest in the Three Gorges reservoir region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(5):103-106.

[29] 王清荣,李阳兵,赵雯欣,等.近30年来三峡库区土地利用与生态环境效应研究热点演变及展望:基于Citespace的文献可视化分析[J].生态学报,2024,44(5):2159-2172.
Wang Qingrong, Li Yangbing, Zhao Wenxin, et al. Evolution and prospect of research hotspots on land use and eco-environmental effects in Three Gorges reservoir area in recent 30 years: Based on citespace's literature visualization analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5):2159-2172.

[30] Zhang Fuyao, Li Xiubin, Wang Xue, et al. CMIP6-driven 10 km super-resolution daily climate projections with PET estimates in China [J]. Scientific Data, 2025, 12:720.