

DOI: 10.20103/j.stxb.202411262895

赵荣钦*, 姚双胜, 姬宇飞, 谢志祥, 肖连刚, 李寒冰, 吉佳宇. 土地利用碳风险: 内涵与研究框架. 生态学报, 2025, 45(16): - .

Zhao R Q, Yao S S, Ji Y F, Xie Z X, Xiao L G, Li H B, Ji J Y. Land use carbon risk: definition and research framework. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): - .

土地利用碳风险: 内涵与研究框架

赵荣钦*, 姚双胜, 姬宇飞, 谢志祥, 肖连刚, 李寒冰, 吉佳宇

华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450046

摘要: 对土地利用碳风险进行科学界定并构建研究框架, 对于探索面向气候韧性和碳减排的土地利用模式, 提升国土空间应对气候变化能力具有重要意义。在梳理国内外相关研究的基础上, 探讨了土地利用碳风险的内涵、特征、类型及影响因素, 构建了土地利用碳风险的研究框架, 并提出了未来的主要研究领域。主要结论如下: (1) 土地利用碳风险是土地利用活动导致的碳循环系统整体或局部环节发生显著变化, 引发区域碳收支突破临界阈值, 从而对气候、生态或经济社会系统造成不可逆的潜在威胁的现象。(2) 研究核心在于结合风险源-风险受体-风险效应的理念, 揭示土地利用对碳风险的影响机理, 分析其成因、类型、传导路径与驱动机制的区域差异, 并提出土地利用碳风险缓解对策与优化调控路径。(3) 未来应基于不同尺度、不同视角开展“空-天-地”一体化的土地利用碳风险量化评估、动态模拟、驱动机制、监测预警及优化调控研究, 为增强土地系统韧性、实现土地利用与碳风险协同管理提供理论基础和决策依据。

关键词: 土地利用; 碳风险; 内涵; 框架

Land use carbon risk: definition and research framework

ZHAO Rongqin*, YAO Shuangsheng, JI Yufei, XIE Zhixiang, XIAO Liangang, LI Hanbing, JI Jiayu

College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

Abstract: Scientifically defining land use carbon risk (LUCR) and establishing a comprehensive and systematic research framework are crucial for significantly advancing the exploration and understanding of land use patterns that not only effectively promote climate resilience and facilitate carbon emission reduction but also enhance and improve the adaptive capacity and resilience of territorial spaces to the ongoing and increasingly severe impacts of climate change. Based on an extensive and critical review and synthesis of a wide range of relevant studies and literature conducted both at home and abroad, this study systematically and comprehensively examined the definition, key characteristics, major types, and influencing factors of LUCR. Furthermore, it developed and proposed a structured research framework for LUCR and identified and highlighted several critical directions for future research endeavors, which are expected to contribute significantly to the theoretical development and practical application in this field. The principal findings were summarized as follows: (1) Land use carbon risk was defined as the phenomenon whereby various land use activities, inducing significant and substantial changes in either the overall or localized carbon cycle systems, ultimately lead to the exceedance of critical and sensitive thresholds in the regional carbon balance. This resulting disruption, in turn, consequently poses serious, potentially irreversible and profound threats to climatic systems, ecological integrity, as well as economic and social systems. (2) The core of LUCR research was primarily focused on the comprehensive integration of three interrelated and mutually influential concepts: risk source, risk receptor, and risk effect. This integrated approach aimed to systematically

基金项目: 国家自然科学基金(42471296); 2023 年度国家社科基金重大项目(23&ZD099); 自然资源部碳中和与国土空间优化重点实验室开放基金项目

收稿日期: 2024-11-26; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaorq234@163.com

elucidate the underlying mechanisms through which various land use activities impacted carbon risk, analyze regional variations and spatial heterogeneity in its causes, types, transmission pathways, and driving mechanisms, and propose scientifically grounded mitigation measures and practical optimization strategies for effectively addressing and managing LUCR. (3) Future studies should prioritize multi-scales and multi-perspectives investigation, employing a comprehensive and integrated “space-air-ground” collaborative approach. This should include encompassing quantitative assessment, dynamic simulation, driving mechanism analyses, and the establishment and continuous improvement of monitoring and early warning systems specifically for LUCR. In addition, the development and implementation of scientifically grounded and practically applicable optimization strategies are crucial for significantly enhancing the resilience and adaptive capacity of land systems to carbon risks. These concerted efforts would provide a solid theoretical basis and practical decision-making support for achieving the synergistic management of LUCR, thereby contributing to the broader goals of climate change mitigation and sustainable territorial development.

Key Words: land use; carbon risk; definition; framework

在全球气候变化加剧的背景下,土地利用扩张及其伴生的大量化石能源消费产生的碳排放对全球和区域碳平衡带来严重威胁,增加了生态系统和经济社会发展的潜在风险^[1-3]。尽管《国家适应气候变化战略2035》和《生态文明建设实施纲要》明确将评估和监测土地利用活动碳效应作为实现“双碳”目标的重要手段,但现有研究主要聚焦于土地利用碳收支量化核算与碳平衡分析方面^[4-6],缺乏对“土地利用-碳风险”复杂作用机理与研究框架的系统解析,从而不利于科学指导面向“双碳”目标的国土空间规划实践。

国内外学者从不同领域、不同视角对风险问题开展了相关研究,从研究内容的系统性来看,当前研究普遍采用定量模型和情景分析方法,在风险^[7]、生态风险^[8]、土地利用生态风险^[9]、碳风险^[10]、土地利用碳风险^[11]及水-土-能-碳系统风险^[12-13]等领域取得了显著进展,这些研究应用领域涵盖社会、经济、生态、环境及资源管理等多个方面,研究尺度从宏观(国家、区域)到微观(企业、地块)不等,重点探讨风险起源^[14-15]、灾害影响^[16]、健康风险^[17]、市场波动^[18-19]、生态安全^[20]及环境管理^[21]等议题。从研究视角看,主要集中在风险评估方法^[22]、风险传播机制^[23]及风险与韧性关系^[24]等方面。在碳风险研究方面,学术界主要聚焦于碳效应评估^[25]、企业碳排放的财务风险评估^[26]、碳储量与生态风险关系研究^[27]、碳收支格局与碳平衡分区研究^[28]以及政策影响评估^[29]等,为探索碳排放与环境、社会经济系统的互馈机制提供了重要参考。国内研究重点关注碳排放路径的变化^[30]、政策影响^[31]及碳风险管理机制^[32],围绕企业财务风险^[33]、碳足迹^[34]和生命周期碳评估^[35]等,侧重于从风险管理的角度探讨碳风险的识别、评价与管控问题。国外研究则基于资本市场的面板数据对碳风险管理及企业成本^[18]、财务绩效或企业价值之间的关系进行实证检验^[36-39]。而土地利用碳风险研究仅在土地利用碳效应和碳平衡方面有所涉及,一是开展土地利用活动的碳源/汇效应及碳平衡研究,量化不同土地利用类型及其组合变化对碳排放的贡献程度^[40];二是开展土地利用变化与碳风险的关系研究,比如贾科利等^[41]提出了“碳源-碳汇”模型,并结合土地利用碳风险指数及碳足迹压力模型评估土地利用变化对碳风险的影响。上述研究为土地利用碳风险评估提供重要的参考借鉴,但缺乏对土地利用碳风险概念的科学界定和梳理,尚未形成系统的土地利用碳风险研究体系。

综上所述,现有研究对土地利用碳风险的内涵、研究体系与框架还缺乏深入的总结和系统梳理。因此,亟需构建土地利用碳风险的系统性研究框架,这对于深化气候变化背景下土地、生态、管理等多学科交叉研究,开展面向“双碳”目标的国土空间管控、生态治理与修复、主体功能区规划等具有重要的理论和实践意义。本文在梳理国内外相关研究的基础上,探讨了土地利用碳风险的内涵、特征、类型及影响因素,构建了土地利用碳风险的研究框架,并提出了主要研究领域,以期对差异化碳风险分级管控、区域碳补偿机制设计及“双碳”目标导向的国土空间治理提供理论参考和借鉴。

1 土地利用碳风险的内涵与特征

本文以“内涵-特征-类型-机制”为逻辑链条,尝试从科学内涵、本质属性、类型划分和影响机制等方面对土地利用碳风险进行科学界定和理论阐释,为构建科学的土地利用碳风险研究框架提供理论基础。

1.1 内涵界定

土地利用碳风险(Land use carbon risk, LUCR)是指土地利用活动导致的碳循环系统整体或局部环节发生显著变化,引发区域碳收支突破临界阈值,从而对气候、生态或经济社会系统造成不可逆的潜在威胁的现象。土地利用碳风险的核心构成包含三个关键要素:风险源(土地利用变化)、风险受体(如气候系统、生态系统或经济社会系统)和潜在影响(对风险受体的损害程度)。其本质特征是土地利用活动(方式、强度、格局等的变化)导致区域碳系统发生不可逆转的改变和受损(通常以概率和影响程度来衡量),主要表现为碳排放加剧、碳汇功能削弱、碳流通过程或路径发生明显改变,一旦突破某一临界值,造成无法逆转的碳平衡状态的失调,并导致持久的生态破坏、气候影响或经济社会系统受损(图1)。

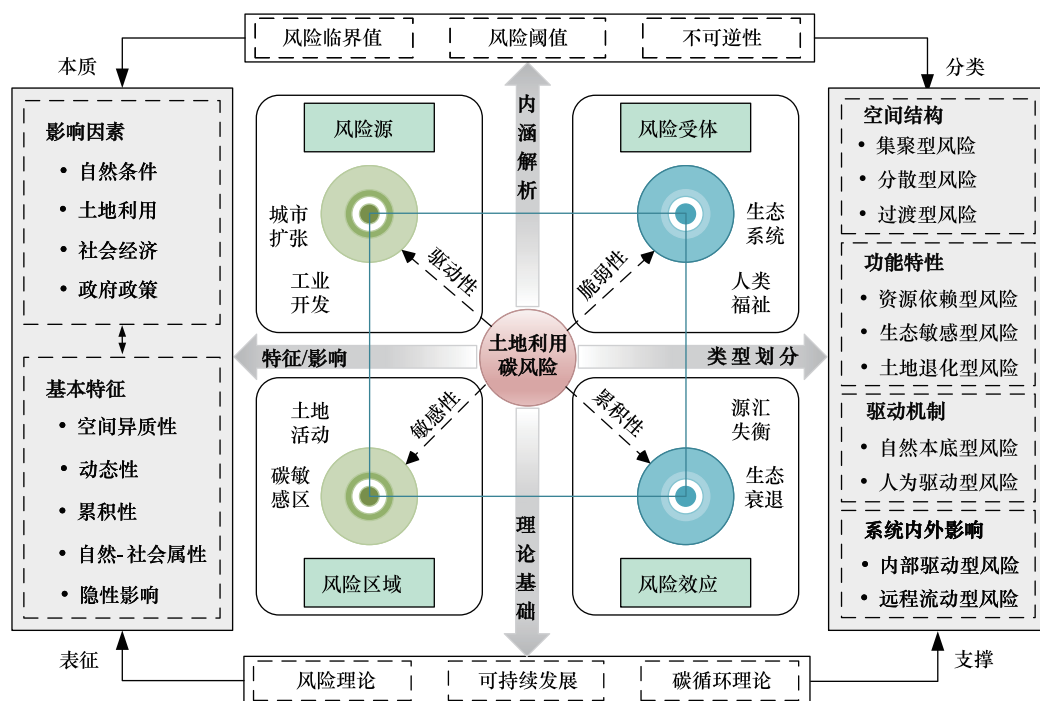


图1 土地利用碳风险的内涵、特征与分类

Fig.1 The definition, characteristics and classifications of land use carbon risk

1.2 基本特征与类型划分

土地利用碳风险具有空间异质性、动态性、累积性、自然-社会二元属性^[42]、隐性影响等特征,这些特征又进一步决定了土地利用碳风险的基本类型和研究对象的时空尺度。(1)空间异质性:不同地区碳储存和碳汇能力的本底状况存在差异,加之土地利用方式和强度的空间异质性,导致碳风险在空间上呈现显著差异。基于此,土地利用碳风险可划分为集聚型风险、分散型风险和过渡型风险。(2)动态性:自然环境变化和土地利用活动使区域碳过程在时空上发生动态波动,碳风险呈现出周期性与不确定性。据此,土地利用碳风险可分为短期碳风险和长期碳风险。(3)累积性:随着人类开发、建设和土地利用强度的提高,碳风险不断积累,最终导致碳循环失衡。基于累积性特征,土地利用碳风险可分为资源依赖型风险、生态脆弱型风险和土地退化型风险等。(4)自然-社会二元属性:碳风险受自然和社会双重因素驱动,土地利用活动通过影响自然生态系统(如气候变化、生物多样性)和人类经济社会系统(如产业发展、资源开采)改变区域碳过程。据此,土地利

用碳风险可分为自然本底型风险和人为驱动型风险,后者进一步细分为农业生产驱动型、城市扩张驱动型、产业发展主导型和资源开采破坏型等。(5)隐性影响:国际(区际)贸易和服务流带来的虚拟土地流动对区域碳过程产生隐性影响,导致碳风险的跨区域扩散。基于此,土地利用碳风险可分为区域内部失衡型风险(如碳源型、碳汇型及源/汇双重型风险^[43])和区际远程流动型风险(如流入型风险和流出型风险)。

1.3 影响因素

土地利用碳风险受自然条件、土地利用活动、社会经济因素及政府政策等多因素影响。(1)自然条件(区域气候条件、地形特征及生态系统类型等)是决定区域碳源/汇状况的基本要素,气候及自然生态系统结构的变化会引起碳收支的时空变化,并可能引发碳风险。(2)土地利用(如资源开发、农业生产、城市建设等)及其变化会引起不同土地利用类型的碳源/汇强度发生改变,进而决定土地利用碳风险的类型和强度。(3)社会经济活动(如人口增长、经济发展、产业演替和技术变革等)通过改变土地利用的强度、结构和效率,进而驱动土地利用碳风险强度的空间分异。(4)政府政策会加剧或延缓土地利用碳风险。比如区域开发政策、资源开采或某种产业支持政策可能会加剧局部地区的碳风险;反之,生态保护、土地修复、减排限制、土地利用管控、碳金融等措施能有效缓解土地利用碳风险。以上多因素共同影响着区域碳源/汇的结构和强度,并决定了区域土地利用碳风险状况。

2 土地利用碳风险的研究框架与主要研究领域

2.1 研究框架

土地利用碳风险研究应以自然-社会-经济复合系统理论为基础,遵循“风险源-风险受体-风险效应”的研究理念,重点围绕土地利用结构、功能与空间布局等核心要素,系统揭示土地利用活动对区域碳循环过程的作用机制,科学构建土地利用碳风险的量化准则与分类标准,深入解析其多尺度驱动机制,并探索面向“双碳”目标的土地利用碳风险优化调控路径(图2)。开展土地利用碳风险研究需从多维度系统解析其作用机理、研究视角与核心内容。在作用机理层面,应重点解析不同用地类型空间组合模式及其碳源/汇特征,结合区域土地承载能力阈值、区域功能定位(如城镇发展区、农业生产区、生态保育区等),量化土地利用效率差异对碳循环过程的影响。具体而言,通过揭示不同土地利用类型空间邻接效应、不同土地利用开发强度与区域碳风险的响应关系,从而阐明土地利用活动、区域碳循环过程以及碳风险之间的多尺度互馈机制;从研究视角来看,应从不同时空尺度入手构建“时空动态-系统韧性-复杂联系-风险扩散-反馈机制”的综合研究框架,揭示土地利用碳风险来源、风险受体,风险频率、风险强度、风险暴露、风险区域及风险扩散与传导路径,并基于土地系统的适应性-恢复力-抵抗力建立碳风险及韧性的量化评估体系,识别碳风险的关键驱动因素及其作用强度;就研究内容而言,可遵循“风险识别-量化评估-驱动机制-预警模拟-优化调控”的逻辑主线开展研究,从土地利用功能转型、强度梯度、效率提升、结构优化及空间重构等多维视角探讨土地利用对碳风险的动态影响机制,探索面向“双碳”目标的土地韧性评估方法,实现对土地利用碳风险的精准识别、预警模拟、韧性评估和优化调控,为制定科学的国土空间管控和碳风险缓解对策提供实践指导。

总体而言,土地利用碳风险研究的核心是基于土地系统视角,从土地利用结构、功能、强度、效率等特性入手,开展土地利用碳风险识别-评估-预警-应对-调控等研究,揭示土地利用对碳风险的影响机理,分析土地利用碳风险的成因、类型、传导路径与驱动机制的区域差异,提出差异化的土地利用碳风险应对与调控策略,为增强土地系统韧性、实现土地利用与碳风险协同管理提供理论基础和决策依据。

2.2 主要研究领域

基于以上框架,在土地利用碳风险研究中,多尺度耦合与多学科交叉是突破传统研究范式的关键路径。因此,未来研究应基于不同时空尺度下土地利用系统与碳过程的互馈关系,综合运用复杂系统理论、深度学习、多智能体建模等前沿技术手段,基于“空-天-地”一体化手段开展土地利用碳风险量化评估、动态模拟、驱动机制、监测预警及优化调控研究。主要研究领域包括以下方面:

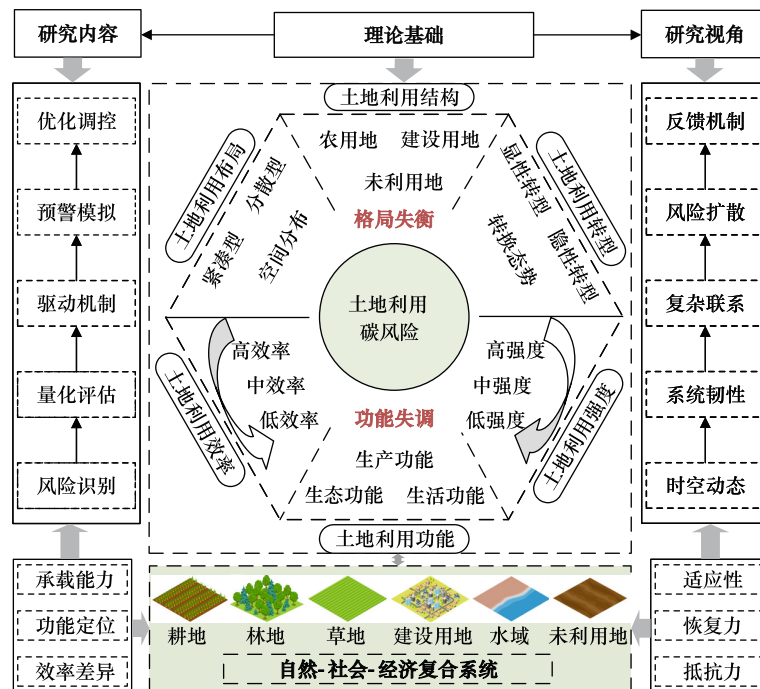


图2 土地利用碳风险研究框架

Fig.2 Research framework for land use carbon risk

(1) 基于生命周期视角的土地利用碳风险精准量化与分类评估。基于“空-天-地”一体化手段和多源数据,精准量化土地利用全生命周期的碳收支、碳流通、碳转移及碳平衡状况,构建以排放强度、碳汇能力、碳风险暴露度、碳平衡特征及碳收支转换态势等为核心的本地化因子的土地利用碳风险评估方法体系,并结合区域自然本底条件、土地利用特点和碳过程规律,评估不同土地利用类型及其组合下的碳风险程度;通过明确土地利用碳风险不同类型的属性、特征、边界及关键影响因子制定土地利用碳风险量化准则与分类标准,对区域土地利用碳风险进行类型划分和分区识别;引入风险强度、风险类型、风险效应等多维度指标,建立基于“等级-类型-效应”的集成评估模型,识别土地利用碳风险的剧烈程度及风险高发区域,建立区域碳风险动态分级分类技术体系,为区域碳风险管理提供科学依据。

(2) 基于多尺度视角的土地利用碳风险驱动因素及互馈机制研究。在不同时空尺度上识别并筛选影响土地利用碳风险的关键驱动因子,并区分直接驱动(气候变化、土地利用类型变化、产业活动、资源开发等)与间接驱动(政策干预、技术进步、消费行为等)因素。在宏观尺度上,解析自然过程、土地利用活动、城市化、产业发展等对土地利用碳风险时空格局及演变的作用机制;在微观尺度上,基于原位观测、样点调研等开展土地利用变化及人类活动对碳风险的影响机理研究,为土地利用碳风险类型的精确识别和精细化的区域碳治理提供路径参考。此外,结合关键驱动因子的差异及不同碳风险类型区,选取不同土地利用类型、强度组合及土地利用冲突/错配明显的典型区域,分析土地利用碳风险特征与关键驱动因素之间的反馈效应和作用机制,加强对不同风险类型复合效应的研究,关注碳风险的多维驱动机制及贡献度的差异。

(3) 基于深度学习的土地利用碳风险时空演化及传导规律研究。构建多尺度、多层次、长时序的动态模拟框架,强化碳风险时空格局的动态监测、过程评估和情景模拟,基于微观与宏观过程的动态联动推动土地利用碳风险由静态评估向动态模拟的转变;开发多尺度耦合模拟模型,识别不同时空尺度上碳风险的关键影响因子及其贡献程度,揭示土地利用碳风险的尺度效应和耦合机制;依托深度学习技术和风险扩散模型,从自然-经济-社会复合系统视角探讨土地利用碳风险及其动态扩散过程的主要影响因素,识别土地利用碳风险的时空关联机制及扩散路径,揭示碳风险在不同区域、不同产业及不同土地利用类型之间的传导规律和互馈

机制。

(4) 基于多智能体建模的土地利用碳风险动态监测与预警体系。从栅格尺度和多区域尺度实时掌握碳排放强度及其构成与碳汇承载格局状况,对碳风险的演化趋势、等级变化、风险扩张、传导路径等进行动态监测和智能评估;将多智能建模方法纳入碳风险监测和预警平台,动态解析土地利用碳风险与生态、社会经济系统之间的多尺度时空交互作用;基于风险评估等级设定风险阈值,建立土地利用碳风险预警模拟技术体系,实现对碳风险程度及其驱动因子的实时预警。对具有高风险和突发性的快速城市化地区、生态脆弱区和土地利用空间冲突剧烈地区等进行重点监测,强化对高风险区域的碳风险识别、动态追踪和实时预警。此外,要注意在数据获取、数据精度、监测方法、风险单元划分、权重赋值、风险阈值和预警等级等方面实现标准化,有效降低碳风险评估和预警的不确定性,为全国统一的土地利用碳风险管理和国土空间管控提供更加科学的决策依据。

(5) 社会-生态系统韧性视角下的土地利用碳风险自适应调控研究。将社会-生态系统韧性理论纳入碳风险及其管理研究,构建“暴露度-敏感性-适应能力”三维评估框架,从碳失衡风险程度、碳风险敏感性、碳汇恢复潜力等方面量化土地系统对碳风险的抗扰能力与恢复潜力;探索土地利用功能、结构和效率异质性背景下碳风险的演化规律与自适应调控机制,结合情景模拟与多目标优化,提出韧性导向的土地利用优化调控方案,例如在生态脆弱区优先布局“碳汇-防灾”复合型用地,在城市扩张区设置动态碳风险缓冲带;采用网络拓扑分析和韧性评估方法,识别关键脆弱节点(如高碳排放功能区)及其碳风险扩散路径,从土地利用结构调整、强度约束和空间布局等方面提出有助于碳风险缓解及自适应调控的策略。

(6) 面向多目标治理与碳风险韧性提升的国土空间优化调控路径与政策研究。依据区域土地利用碳风险量化结果、等级划分、演变趋势及风险阈值的差异,结合区域资源禀赋、生态承载能力、主体功能定位及经济社会发展态势等,制定区域差别化的调控目标和优化调控技术方案;以国土空间规划为依托,将土地利用碳风险调控目标纳入“双评价”和“三区三线”划定,建立基于多目标的土地利用碳风险综合调控模型,评估对比未来不同土地利用情景下的碳风险空间特征、演变趋势及等级构成,并从空间格局优化视角提出土地利用碳风险管控方案;从土地利用布局、生态修复、城市扩张管控、用地集约、产业调控、区域碳补偿等多方面提出针对不同类型碳风险区域的调控策略。统筹区域碳排放需求、居民福祉和减排目标,建立科学的土地利用碳风险差别化管控方案。

3 结论

本文在系统梳理碳风险相关文献的基础上,提出土地利用碳风险是土地利用活动导致的碳循环系统整体或局部环节发生显著变化,引发区域碳收支突破临界阈值,从而对气候、生态和经济社会系统造成不可逆的潜在威胁的现象,其具有空间异质性、动态性、累积性、自然-社会二元属性、隐性影响等特性,并受自然条件、土地利用活动、社会经济因素及政府政策等多因素影响;据此构建了以“风险识别-量化评估-驱动机制-预警模拟-应对措施-优化调控”为逻辑主线的研究框架,强调从“时空动态-系统韧性-复杂联系-风险扩散-反馈机制”多维视角揭示土地利用对碳风险的影响机理,解析其成因、类型、传导路径与驱动机制的区域差异;未来研究应深度融合复杂系统理论、深度学习与多智能体建模等前沿技术手段,重点突破“空-天-地”一体化的土地利用碳风险动态量化评估、多尺度驱动机制解析、风险传导智能建模及社会-生态系统韧性导向的土地利用碳风险自适应调控规律等关键领域,并提出面向多目标治理与碳风险韧性提升的国土空间优化调控方案与政策路径。

参考文献(References):

- [1] Adger W N, Barnett J, Heath S, Jarillo S. Climate change affects multiple dimensions of well-being through impacts, information and policy responses. *Nature Human Behaviour*, 2022, 6(11): 1465-1473.
- [2] Simmonds M B, Di Vittorio A V, Jahns C, Johnston E, Jones A, Nico P S. Impacts of California's climate-relevant land use policy scenarios on

- terrestrial carbon emissions (CO_2 and CH_4) and wildfire risk. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(1): 014044.
- [3] 赵荣钦, 黄贤金, 鄢文聚, 吴克宁, 陈银蓉, 王少剑, 卢鹤立, 方恺, 李宇. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1123-1136.
- [4] Arneth A, Sitch S, Pongratz J, Stocker B D, Ciais P, Poulter B, Bayer A D, Bondeau A, Calle L, Chini L P, Gasser T, Fader M, Friedlingstein P, Kato E, Li W, Lindeskog M, Nabel J E M S, Pugh T A M, Robertson E, Viovy N, Yue C, Zaehle S. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 79-84.
- [5] McManamay R A, Vernon C R, Chen M, Thompson I, Khan Z, Narayan K B. Dynamic urban land extensification is projected to lead to imbalances in the global land-carbon equilibrium. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 70.
- [6] Yue C, Ciais P, Houghton R A, Nassikas A A. Contribution of land use to the interannual variability of the land carbon cycle. *Nature Communications*, 2020, 11: 3170.
- [7] 宁嘉辰, 吴吉东, 唐茹玫, 陈笑娟, 许映军. 多灾种风险评估方法述评——基于 5 份国际权威报告的对比分析. *地理科学进展*, 2023, 42(1): 197-208.
- [8] Li J L, Hu D W, Wang Y Z, Chu J L, Yin H W, Ma M. Study of identification and simulation of ecological zoning through integration of landscape ecological risk and ecosystem service value. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 107: 105442.
- [9] Liu J X, Wen C X, Liu Z W, Yu Y. From isolation to linkage: Holistic insights into ecological risk induced by land use change. *Land Use Policy*, 2024, 140: 107116.
- [10] Liêu M L, Dao T, Nguyen T H, Trinh V Q. Climate governance and carbon risk in the global energy sector: Insights into corporate environmental initiatives. *Energy Economics*, 2024, 137: 107782.
- [11] Zhong J L, Qi W, Dong M, Xu M H, Zhang J Y, Xu Y X, Zhou Z J. Land use carbon emission measurement and risk zoning under the background of the carbon peak: a case study of Shandong Province, China. *Sustainability*, 2022, 14(22): 15130.
- [12] 赵荣钦, 姬宇飞, 冯薇, 谢志祥, 肖连刚, 李寒冰. 基于土地利用的水—能—碳关联研究: 理论框架与关键问题. *中国土地科学*, 2024, 38(8): 97-108.
- [13] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, Milind Kandlikar, 张战平, 丁明磊. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析. *地理学报*, 2016, 71(9): 1613-1628.
- [14] Holton G A. Defining risk. *Financial Analysts Journal*, 2004, 60(6): 19-25.
- [15] Aven T. The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 99: 33-44.
- [16] 王军, 李梦雅, 吴绍洪. 多灾种综合风险评估与防范的理论认知: 风险防范“五维”范式. *地球科学进展*, 2021, 36(6): 553-563.
- [17] Liu X S, Zhang X, Jin B W, Hadiatullah H, Zhang L Y, Zhang P, Wang T, Deng Q H, Querol X. Online monitoring of carbonaceous aerosols in a northern Chinese city: Temporal variations, main drivers, and health risks. *Atmospheric Environment*, 2024, 316: 120169.
- [18] Nguyen J H, Phan H V. Carbon risk and corporate capital structure. *Journal of Corporate Finance*, 2020, 64: 101713.
- [19] Monasterolo I, de Angelis L. Blind to carbon risk? An analysis of stock market reaction to the *Paris Agreement*. *Ecological Economics*, 2020, 170: 106571.
- [20] 张欣欣, 金晓斌, 梁坤宇, 韩博, 王世磊, 朱文洁, 梁鑫源, 周寅康. 社会-生态系统视角下快速城市化地区生态风险评价与管控分区——以江苏省为例. *生态学报*, 2024, 44(18): 8138-8149.
- [21] Sharfman M P, Fernando C S. Environmental risk management and the cost of capital. *Strategic Management Journal*, 2008, 29(6): 569-592.
- [22] 孙垦, 蔡洪涛, 杨崇豪. 风险定量分析中风险矩阵的构建方法. *华北水利水电学院学报*, 2011, 32(5): 158-160.
- [23] 黄崇福. 风险分析基本方法探讨. *自然灾害学报*, 2011, 20(5): 1-10.
- [24] 王红瑞, 杨亚锋, 杨荣雪, 邓彩云, 巩书鑫. 水资源系统安全的不确定性思维: 从风险到韧性. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2022, 43(1): 1-8.
- [25] Zhang X, Zhang D. Urban carbon emission scenario prediction and multi-objective land use optimization strategy under carbon emission constraints. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 430: 139684.
- [26] Bolton P, Kacperczyk M. Global pricing of carbon-transition risk. *The Journal of Finance*, 2023, 78(6): 3677-3754.
- [27] Peng Y L, Cheng W Y, Xu X X, Song H F. Analysis and prediction of the spatiotemporal characteristics of land-use ecological risk and carbon storage in Wuhan metropolitan area. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111432.
- [28] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 秦耀辰, 刘英, 丁明磊, 焦士兴. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区. *地理学报*, 2014, 69(10): 1425-1437.
- [29] 胡广文, 顾一帆, 吴玉锋, 穆献中. 中国实现碳中和: 降碳风险的识别与应对. *北京工业大学学报: 社会科学版*, 2024, 24(1): 135-146.
- [30] Shao L, Li Y, Feng K S, Meng J, Shan Y L, Guan D B. Carbon emission imbalances and the structural paths of Chinese regions. *Applied Energy*, 2018, 215: 396-404.

- [31] 赵荣钦, 刘英, 李宇翔, 丁明磊, 张战平, 揣小伟, 焦士兴. 区域碳补偿研究综述: 机制、模式及政策建议. 地域研究与开发, 2015, 34(5): 116-120.
- [32] Xie Z X, Wang L, Zhao R Q, Xiao L G, Ding M L, Yao S S, Chuai X W, Rong P J. County-level carbon budget and carbon compensation in the Yellow River Basin: a perspective with balancing efficiency and equity. *Environment, Development and Sustainability*, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05503-7>.
- [33] Wang J X, Qiang H F, Liang Y C, Huang X, Zhong W R. How carbon risk affects corporate debt defaults: Evidence from *Paris* agreement. *Energy Economics*, 2024, 129: 107275.
- [34] Ju H R, Zeng G T, Zhang S R. Inter-provincial flow and influencing factors of agricultural carbon footprint in China and its policy implication. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 105: 107419.
- [35] Rong T Q, Zhang P Y, Zhu H R, Jiang L, Li Y Y, Liu Z Y. Spatial correlation evolution and prediction scenario of land use carbon emissions in China. *Ecological Informatics*, 2022, 71: 101802.
- [36] Park D, Lee J, Park H. The asset-pricing implications of carbon risk in Korea. *Journal of International Financial Management & Accounting*, 2024, 35(1): 7-35.
- [37] Zhong T Y, Ma F Q, Sun F C, Li J N. Can green finance reduce corporate carbon risk? *Finance Research Letters*, 2024, 63: 105234.
- [38] Schiemann F, Sakhel A. Carbon disclosure, contextual factors, and information asymmetry: the case of physical risk reporting. *European Accounting Review*, 2019, 28(4): 791-818.
- [39] Nsabiyeze A, Ma R Q, Li J, Zhao Q N, Zhang M J. Mitigating greenhouse gas emissions from sheep production system in China: an integrated approach of data envelopment analysis and life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 207: 107695.
- [40] Han F Q, Kasimu A, Wei B H, Zhang X L, Aizizi Y, Chen J Z. Spatial and temporal patterns and risk assessment of carbon source and sink balance of land use in watersheds of arid zones in China-a case study of Bosten Lake basin. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111308.
- [41] 贾科利, 李小雨, 魏慧敏, 刘瑞亮, 李浩宇, 杨思雨. 宁夏县域土地利用碳排放空间分异与风险研究. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1757-1767.
- [42] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 张战平, 黄贤金, 秦耀辰. 区域二元碳收支的理论方法研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(5): 554-568.
- [43] 吉佳宇, 谢志祥, 赵荣钦, 肖连刚, 肖千虎, 蔡辰. 基于碳收支格局及其转换态势的区域碳失衡风险分析. 环境科学, 2024, 45(11): 6365-6376.