

人地互动关键带的内涵与理论框架探索

杨蓉^{1,2,3}, 袁振杰^{1,2,3}, 尹铎^{1,2,3}, 朱竑^{1,2,3}

(1. 广州大学地理科学与遥感学院 华南人文地理与城市发展中心, 广州 510006; 2. 广东省城市与移民研究中心, 广州 510006; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要:“地球关键带”是为响应全球可持续发展及其重大挑战所提出的前沿概念。当前地理学者主要从地理要素循环与物质交换的视角,为揭示地球关键带的功能结构和动态演化提供了分析工具和手段。但人类活动与社会系统和地球关键带之间的复杂作用关系尚不明确。本文对话关键带研究,对地球关键带这一概念进行溯源式回顾,结合人文地理学者对人地关系理论的长期研究积累及其在服务区域发展中的经验模式,着眼于全球化、现代化和城市化发展背景下的人类社会发展与地球表层系统演化的相互作用方式、模式、过程与机制,提出“人地互动关键带”的概念,并探索形成“源—流—汇”为核心的人地互动关键带的理论框架。本文认为,人地互动关键带理论可在研究视角上有效整合地球表层自然和人文的时空过程,将人类社会的复杂运作逻辑与实践和地球关键带现有理论框架进行深度融合;在实践上,人地互动关键带理论将有助于地理学家更好地诠释关键地带发展格局与过程,共同助力国家科学制定空间、环境与社会发展战略,促进国土空间高质量发展并有效促进自然系统与社会系统的深度、高效协同。

关键词: 地球关键带; 人地互动关键带; 人地互动; 理论框架; 人类世

DOI: 10.11821/dlxb202311002

1 引言

“地球关键带”(Earth's Critical Zone)^①是地球表层各个圈层通过物质迁移和能量交汇进行相互作用的复杂系统,也是维系地球生态系统功能和人类生存的关键区域。这一概念诞生于21世纪地球环境变化对可持续发展和人类福祉形成挑战的宏观背景和研究前沿^[1],着眼地球表层圈层的要素、相互作用及其动态过程。地球关键带作为地球表层清晰的三维空间,为多学科研究提供了精准、明确的研究对象^[2-3]。可见,地球关键带概念的提出为地球系统研究提供了新的理论平台,同时,在多尺度、多学科、多要素地球科学研究体系中也衍生出系列新命题^[4]。

地球关键带科学是一个始于地球科学,落于多学科的前沿领域。受到地球化学、地貌学、水文学、土壤学、生态学和微生物学等学科重视,内容聚焦于全球或特定区域关

收稿日期: 2022-10-24; 修订日期: 2023-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(42142025, 41971184, 42071183, 42271217); 广东省自然科学基金项目(2018B030312004, 2022B1515020087) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42142025, No.41971184, No.42071183, No.42271217; Natural Science Foundation of Guangdong Province, No.2018B030312004, No.2022B1515020087]

作者简介: 杨蓉(1990-), 女, 甘肃临夏人, 博士, 研究方向为城市社会文化地理学。E-mail: yangr@gzhu.edu.cn

通讯作者: 朱竑(1968-), 男, 甘肃临夏人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为社会文化地理学。

E-mail: zhuhong@gzhu.edu.cn

① “地球关键带”是2001年由美国国家研究委员会地球科学基础研究委员会提出的概念。

键带内的物理、化学和生物要素相互耦合过程,通过分析水、碳和能量等相互作用循环,解释关键带内部多要素、多尺度、多过程的耦合机制^[5-6]。由于研究对象在空间上的高度重合,地理学家也长期关注关键带理论,尝试引入了多功能景观、生态系统服务、人地关系地域系统和人地圈等多个相关的概念进行辨析,建立了地理学视角下关键带研究的概念框架^[7]。同时,地理学家也尝试开展了应用研究,从特定关键带内自然地理特征的相似性和差异性出发,通过科学观测、模型模拟和聚类分析等,对关键带进行了类型学研究^[4,7]。可以认为,当前地理学,特别是自然地理学从地理要素循环与物质交换的视角,为揭示关键带的结构、功能、演化过程与机制提供大量的分析工具和手段。

近年来“人类世”概念的提出和确立,提示人类活动与自然环境的界限越来越模糊,相互作用的内生性趋势加剧、作用关系与机制的复杂程度不断提高^[8]。20世纪50年代以来全球人口的迅速增长、土地利用的集约化、全球环境变化以及多元利益群体的价值需求差异正在干扰许多区域发展进程,人类已经成为塑造地球表层系统的主导力量^[9-11]。学者已经关注到农业景观、森林砍伐、水利工程建设、土地利用和自然保护区建设等特定区域地球关键带中人类行为的影响^[12],但人类及其活动对关键带的塑造作用、过程与机制等人地互动原理尚未明确。当前研究多将地球关键带中的人地关系简化表征为主客二元关系:倾向于将人类社会视为关键带生态系统服务的接受者,而忽视了人类社会在塑造和改变关键带进程中的主体能动作用;或者仅关注人类行为对地球关键带特征和过程的消极作用,强调人类和关键带相互关系的不均衡性和不可持续性^[5]。显然这些研究忽视了当前人类社会现代化发展过程中人类社会与自然环境之间相互作用的复杂性,也无法有效阐释新时期特殊区域社会经济发展动态中的多主体、多尺度、多要素耦合对于地球关键带的持续重塑作用。

因此,立足当前科学主义的地球关键带研究,有必要增加有关“人”的理论要素和分析维度,思考并建构人地互动关键带的概念和框架已经成为深化人地系统相互作用机理研究的高层次科学问题。近期有学者发出推动人文地理关键带、人类关键区或人地互动关键带研究的理论呼吁^[13],并获得国家自然科学基金的支持^②。本文通过系统回顾并梳理地球关键带研究,围绕以下3大问题:①如何理解“地球关键带”理论中“关键”一词的内涵?②人地互动理论为何以及如何能为地球关键带研究提供新的视角?③人地互动关键带的理论内涵和相应研究框架是什么?本文认为人地关系的时空性、区域性和综合性将可为关键带研究提供研究视角和方法的补充;同时,人地互动关系模型、发展地理学与区域空间均衡的思想内涵、社会—空间理论等作为人地互动关键带重要的理论基础,将有助于进一步探索人类社会影响和塑造关键带功能、结构和演化进程的模式与机制。通过理论思辨,本文尝试建构人地互动关键带研究的理论框架,探索其在实现人地和谐、区域协同的中国式现代化重大命题过程中的地理学解释力与实践路径。

2 地理学视域下的地球关键带研究:基础与趋势

2.1 地球关键带的地理特性

地球关键带研究从形成之初便具有显著的多学科性和跨学科性,其核心在于理解和探寻地球表层的复杂系统构成、圈层相互作用以及时空演化过程。这为自然地理学和环境科学等相关学科对地球关键带开展研究,提供了清晰的逻辑和框架。地理学者的工作

② 国家自然科学基金委员会地球科学部第2期专项项目为“迈向人文与自然的综合:人—地互动中的关键带研究”。

着眼于地理要素循环与化学物质交换，以水、能量、溶质、碳、氮和沉积物为研究通量，通过气候变化模型、水文模型、水质模型、生态系统模型、土地利用模型等，展开对于地球关键带的结构、功能与演化过程和机制的研究^[2-6]。在此基础上，总结出理解地球关键带4个至关重要的地理特性：界面交互性、空间异质性、过程复合性和动态演化性^[7]。

具体内涵如下：① 界面交互性主要体现为地球关键带在不同垂直圈层或不同水平地域之间，对于能量、水、碳、营养物质、大气成分和污染物的输送和循环过程的承接、过滤、缓冲和阻断等作用^[14]。该交互作用通过物质要素与能量的流动循环为地球关键带的演化提供了基础动力。例如，地面以下的圈层相互作用对地面以上的气候变化与景观重塑发挥着关键调控作用^[15]，而不同区域之间所形成的水文、气候和地貌等交错地带则为不同的生物群落提供了适宜的生境^[5]。② 空间异质性反映了地球关键带的内在复杂性，在垂直和水平方向上具有不同的作用机理^[1]。垂直剖面上因不同的物质特性、密度、厚度、质量转移以及能量积累或者衰减而产生了层化效应。水平方向上的异质性受到内外部自然因素（地质、地貌、水文、虫害等）和人为因素（土地利用、资源开采）的共同塑造^[5]。这使得地球关键带在自然规律塑造下形成了多种形态的地理空间和景观。③ 过程复合性是指关键带的演化处于地球表层不同过程之间的相互作用中，包括水文循环、地球化学循环、碳循环、养分循环、气体交换、侵蚀和沉积、风化、土壤形成和演化、生命过程和人类活动影响等^[13]。这些过程之间具有复杂的相互作用和反馈机制，任何单一定量模型无法对野外观测数据进行全景式探讨^[16]，需要借助耦合模型进行系统分析并运用跨学科的方法^[2-5]。④ 动态演化性指地球关键带在复杂的动力系统驱动下处于不可逆的持续演化过程中，随着时间的推移，演化朝着越来越复杂、有组织、有秩序的系统发展^[5]。其中，自然系统动力受热力学开放和耗散系统驱动，遵循能量和质量守恒、熵和信息积累的定律以及生物进化的规律，使关键带往往处于缓慢的、循序渐进的演化过程中^[5]；而人类活动则极大改变了关键带的演化速率、方向和功能。

综合来看，当前地理学家结合了地理学有关物质组成、要素循环和结构演变等研究传统，揭示出地球关键带演化过程的动力基础、空间特征、耦合作用与动态循环的四重特性，构成了清晰、完整且具有地理学特色的地球关键带研究体系和内容（图1）。

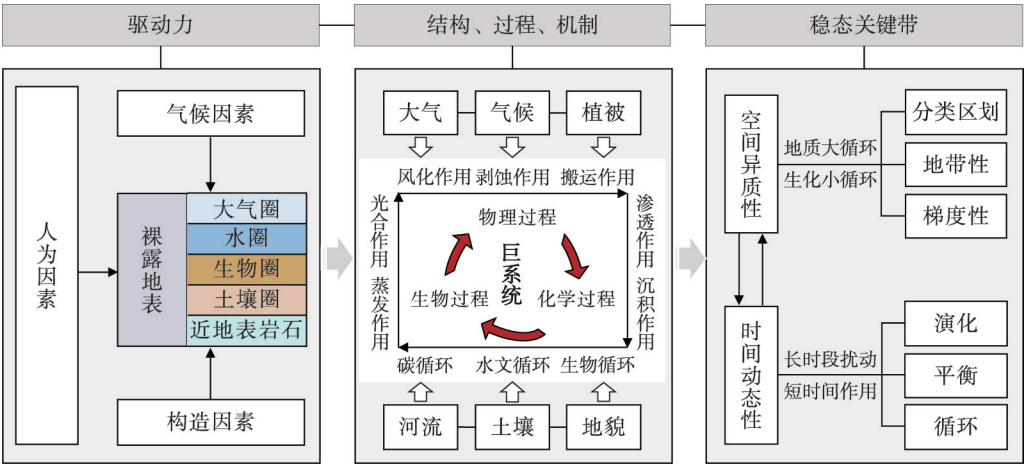


图1 当前地理学视域下的地球关键带研究体系和内容

Fig. 1 The framework and content of the Earth's Critical Zone from a geographical perspective

2.2 人地互动关系:地球关键带研究的趋势

地球关键带自提出之初就重视人类对于关键带进程的多种需求、压力和塑造作用。人类世以来,人类社会对于食物、物资和生活空间的需求不断“扰动”着地球关键带进程,近几个世纪的工业化、城镇化和全球化更使人类成为重塑地球表层面貌的巨大驱动体^[17]。当前,学界虽已广泛承认人类活动对于地球关键带过程的驱动作用,但对于其中人地关系的理解仍然以人类中心主义下的生态系统服务论和生态中心价值观下的人类破坏论为先验知识。因此,急需进一步以人地互动的关系视角重新审视、明晰和扩充关键带空间载体、要素、主体、互动模式和演化机制的认识。

生态系统服务视角下的功能论主导着现有地球关键带研究中对于人地关系的诠释,从关键带的自然生态响应的基本功能出发,最终指向对人类社会经济发展的资源支撑与服务功能。生态系统服务视角是指人类通过从自然环境中直接获取商品和服务而受益,并使用经济价值的观念评估衡量这些利益^[18]。这体现出以人类为中心的本体论立场对于自然环境的伦理准则与复杂价值观的设定^[19]。从这一视角出发,地球关键带因控制着地球上的能量、水、碳、营养物质、大气成分和污染物的输送和循环,被认为对人类的生命、生计和发展具有供给、支持和调节作用,包括食物供给、水质净化与储存、土壤保持、生物多样性维持、气候调节等^[13-14]。例如,已有研究以农业生态系统、城市生态系统、自然保护区等为例,探讨了地球关键带在服务人类社会经济过程中的资源供应、生命维持和环境调控功能^[1, 5, 7]。同时,随着人类社会对于自然环境的诉求愈发多样,地球关键带的社会资源和文化服务价值也受到学者关注^[20],相关研究中将地球关键带的景观和生态系统视为人类文化审美、地方依恋、身份认同与社会凝聚力以及环境教育价值的重要来源^[21],为理解人类社会制度和规范对于关键带的主观塑造作用提供了重要启示。

地球关键带研究中对于人地互动关系的另一层表征是人类对于关键带的破坏性改造,强调人类在生计和发展需求下的改造利用实践导致人地系统失调,继而引发关键带的系统紊乱和演化的不可持续性。这一人类破坏论来源于生态中心主义对于人类中心主义人地观的批判。生态中心主义认为人类是更大生态系统的一部分,由于人类只重视自然环境的工具价值而忽视其内在价值,因此所采取的环境管理方式破坏了自然生态系统的福祉和完整性^[22]。这一观念下,人类被认为是改变地球关键带平衡的重要媒介,在极短时间内通过多种方式参与并改变了关键带物质与能量交换的速率、通量、特征和演化过程^[3, 23]。特别是自20世纪中叶以来,在人口增长、耕地紧张、快速城市化以及基础设施建设等需求下,人类对土地的开发、改造和利用在极短时间内极大改变地球表层土壤的功能与演变过程^[11],不可逆地改变了人类与自然交互的模式以及地球表层的性质,致使环境恶化以及生态灾害风险发生^[24-25]。这表明人类在生计和发展需求下的生产生活实践正在改写地球关键带物质圈层的空间形态和结构,同时地球关键带功能的改变也直接或间接地反作用于人类社会系统本身。

综上,当前地球关键带研究中已经关注到人地关系的多样表征,但仍受到人类中心主义和生态中心主义两种观念主导,强调人类和环境之间单向的、僵化的和被动的二元关系。事实上,人地关系作为人文地理学研究的核心,学者们已经形成了对于动态的、耦合的和复杂的人地互动关系的系列理论和框架。因此,未来研究需要审视二元的人地观下形成的对于人类和地球关键带的先验性认识^[5],从人地互动的关系性视角重新认识地球关键带的空间内涵、理论模型与分析工具,并形成相应的地球关键带研究框架。

2.3 人地互动关键带:理论必要性和创新性

立足于当下全球化、现代化和城市化的现实背景,人地互动关键带将沿用地球关键带的“要素—通量”视角,并着眼于人类社会要素与地球关键带之间的相互作用关系。在当前地球科学视域下所开展的关键带研究中,学者们以水、碳等特定物质和能量要素作为研究通量,应用数学模型分析地球关键带演化的物理、化学和生物等驱动力作用过程^[26]。而在人类世,特别是当前高度现代化的社会背景下,对于地球表层系统的重塑不仅仅是自然要素在自然规律下运行产生的结果,而更多受到人类在不同的经济、制度、文化和伦理等社会框架下对于多种社会要素的需求和再分配的影响。其中,人口、资源、资本、知识、信息和制度等要素在不同的区域、空间、层级、机构、群体和个体之间的流动已经构成了重塑地球表层形态和景观演变的主导性驱动力。可以认为,人地互动关键带中对于人类社会要素的引入,不仅有助于准确识别人类世背景下重塑地球关键带演化的直接驱动力,也将为理解人类和环境之间的复杂互动提供具象化的、具有操作性的数据分析要素。

当前对于地球关键带人地关系的研究多着眼于人类的技术和经济活动等对于环境的直接破坏性改造行为,而忽视了导致这些行为发生的文化、制度和价值观等复杂的社会系统运行规则。事实上,人类对于地球关键带的改造行为在一方面受到社会系统运行规则的制约。例如,在追求经济效益、寻求区域发展以及赢得国家或地方竞争等现代主义的社会话语下,人类对于环境的开发和改造行为显示出在区域、强度和方式上的多种差异。而另一方面,人类与环境之间的相互作用受到社会价值观的影响,源于人类与其他物种和生态系统的情感和认知互动,通过影响人类对于自身在自然环境中的定位,定义着人类对环境的改造行为是否“正确和适当”^[27]。可见,人地互动关键带中对于“人”的理解将超越简单的“直接行动者”,而将“人”视为制度规则和环境伦理之间持续协商的复杂社会系统。这将有助于从人类社会的生产方式变化、社会文化结构以及个体决策的主观性等多维度社会过程中理解人类世下的地球关键带演变机制,也将为人类社会系统调节提供重要的认识基础。

人文地理学长期关注地球表层系统的人地关系,形成了诸如人地关系地域系统、人地圈等着眼人类和环境之间复杂互动反馈作用的概念体系、综合框架与成熟范式^[28-32],为建构人地互动关键带的概念提供了重要的参考。但当前相关实证研究多着眼于乡村、山地、流域,或历史时期聚落与城市等人类活动强度相对较低的人地系统^[33],缺乏对于全球化、城市化和市场化进程中高强度人类活动区域中人地复杂互动的关注^[34-35]。另一方面,当前科学主义观念下的数学模型中对于特定区域人地关系研究呈现精确化、片段化、孤立化态势,大多数学者聚焦于特定城市或区域中的某一人类活动要素对环境要素的影响或者环境要素与人类社会经济指标的支撑^[36]。因此,人地互动关键带将从多要素在区域间流动的关系视角出发,借鉴人文地理学中对于人地关系的相关认识框架、衡量指数、空间尺度与等级评定等研究基础,为地球表面社会经济与自然环境高强度互动提供多要素、多过程、多尺度耦合的视角,并对当前地球关键带研究起到有效且必要的补充作用^[37]。

3 人地互动关键带的理论基础、内涵与探索性理论框架

3.1 人地互动关键带的理论基础

3.1.1 人地互动关系理论模型 过去的一个多世纪中,环境决定论、人类生态学 and 自然灾

害研究等由地理学家构建的人与环境相互作用的理论,都反映出人类与自然的二分法哲学观^[38]。然而,经济全球化、快速工业化和城市化发展正在赋予人地关系新的时代内涵。随着人口增长、技术进步和区域发展,人类改变环境的方式、广度和深度或者对于环境变化的反馈变得更加密集和广泛^[32, 39]。这使得人文地理学者深刻认识到地表人地系统的组成要素间,以及要素与系统间存在着复杂的相互作用和反馈关系,并提出了促进区域可持续发展作为适应新时期人地关系研究的核心和目标^[40]。同时,现代社会中日益增长的流动性使人类和环境之间的互动逐步超出了地理空间边界的限制,使全球环境变化胁迫、人地矛盾频发以及区域间激烈竞争成为所有的国家、区域和地方共同面对的重要议题。可见,在世界实现可持续发展目标和中国致力生态文明高质量发展的新要求下,厘清人地互动关系的核心内涵是形成和完善人地互动关键带概念体系的前提条件。

人地互动是一个跨学科、跨尺度以及城市化的议题。近年随着人地互动理论研究与实践探索的不断深入,将环境压力和社会变化直接联系起来的简单的、确定性的关系不足以解释当前人与环境之间的相互作用。学者们提出需要理解环境系统和人类社会系统运行中所涉及复杂的相互作用和各因素之间的非线性关系^[37, 41]。例如,面对区域人地不协调问题时,既需要分析人地相互作用的维度、动力学和恢复力,同时也需要考虑不同主体或要素之间的权衡、协同作用和反馈效应。因此,相较于经典的人地关系研究,人地互动理论体现出3个方面的特性:①关注人类和环境之间复杂的相互作用与反馈形成的网络关系;②重视所有空间尺度上人类行动与环境变化之间的直接作用和间接影响,使人类通过有效的环境管理在地方或者全球尺度上调节人地矛盾;③相较于乡村、国家公园和自然保护地等人地互动强度相对低的系统,这一概念面向的现实对象与目标是城市化世界的可持续未来^[37]。

立足于以上对于人地互动内涵的认识基础,学者们引入相关学科理论提出了更富解释力和应用性的人地互动关系理论模型^[32, 42-46](表1),这为地球关键带研究提供了可资借鉴的分析视角。当前研究形成了3类直接涉及人地互动核心内涵表征的代表性理论模型:均衡性模型、适应性模型、系统耦合模型。

(1) 均衡性模型:强调环境支撑与人类活动压力之间的均衡性^[43-44]。如压力承载模型,该模型认为人地关系最直观表现是人类经济活动产生的压力和资源要素供给能力的匹配程度,而生态环境约束和区际转移能力对人地关系状态起到调节作用。借鉴主体功能区分级思想,模型将人地关系按状态等级分为极度宽松、相对宽松、基本协调、相对紧张和极度紧张5个等级^[34]。

(2) 适应性模型:强调社会系统对自然环境系统扰动的自我反馈调节作用。这一类模型引入生态学中的脆弱性、恢复力和适应性等概念^[45-46],认为人地系统中的人类主体通过调整其行为、决策和社会经济运行系统结构的方式改善适应能力,以应对自然环境系统变化的负面干扰,实现人地系统可持续发展^[47]。

(3) 系统耦合模型:强调人类经济社会系统与自然生态系统交互作用、相互渗透的人地耦合机理^[32]。该模型着眼于自然过程与人文过程的综合研究,认为社会经济系统是人类活动的主体和人地系统耦合并驱动环境变化的主因,提出了土地利用方式与强度、人口流动与空间集聚、环境排放、资源开发与能源开采、政策管理和环境治理的6个维度的社会经济过程的人地系统耦合机理。

这些代表性理论模型的提出综合了多学科研究中用以处理复杂系统的最适应思想、逻辑与方法,对人地互动关系的理论分析模型建构、定量诠释与思想方法形成均具有重大贡献,极大地丰富了人地关系相关研究,也为人地互动关键带的概念诠释提供了理论

表1 人地互动关系的代表性理论模型

Tab. 1 Representative theoretical model of human-earth interaction

类别	名称	人地互动内涵	关键要素	模型框架	文献
均衡性模型	压力承载模型	人类经济活动产生的压力和资源要素供给能力的匹配程度	资源要素支撑(人均资源量);生态环境约束(脆弱性等);人类活动的施压强度(国土开发);人地系统开放程度(可达性等)。		[43]
	“支点”模型	特定历史时间节点上,人口数量在当时社会经济发展水平下达到饱和,人一地系统达到平衡	气候;环境灾害事件;生存资源;适应人类生存环境;人口数量;人类活动强度;环境改良行为;社会统治体制与政策;技术与社会革新;生产系统。		[44]
适应性模型	社会—生态系统适应性模型	环境、经济和社会之间的相互关系系统能够可持续地提供人类所需的生态系统服务	“风险”“刺激”“压力”等外部扰动(全球环境变化、自然灾害、生态恶化、社会冲突城市病等);人类社会系统对外部扰动的互馈、信息交流与决策机制(如政府调控措施、农户生计行为、策略等)。		[47]
	社会—生态适应性治理模型	通过调节社会—生态系统的权利分配与行为决策机制持续地保障人类福祉	主体(具有不同行为模式和决策能力的个体或集体);结构(主体与环境间的相互关系);动态(系统内部过程或外部扰动)。		[48]
系统耦合模型	人地系统耦合模型	人类经济社会系统与自然生态系统交互作用、相互渗透形成适度耦合,系统会正向演替和协调发展	土地利用(人类社会经济活动强度与自然环境累积作用程度);人口流动与空间集聚(工业化等);环境排放(碳排放等);资源开发与能源开采(直接干扰);政策管理与环境治理(人类调适)。		[32]

依据。对于人地互动关系内涵的认识从平衡状态、动态适应过程和复杂系统耦合的方面突出了人地相互作用、相互影响的对立统一关系，强化了新时期面向人类世、立足人地圈的地表系统演化中人类活动的主导作用。

3.1.2 发展地理学与空间均衡理论综合 发展地理学与区域发展空间均衡的理论视角能够为人地互动关键带的演化过程提供内部驱动力的解释^[49-50]。其中，发展地理学侧重解析发展与社会、经济、政治等关键要素的联系，寻求发达区域与不发达区域之间的差异。这有助于为人地互动关键带内部区域发展格局与过程的社会机制分析提供关键思路。在此基础上引入区域空间均衡的思想，即实现区域发展空间均衡的前提是资源要素在区域间的合理流动^[51]。区域之间发展水平差距形成的势能差，则是导致发展要素在区域间流动，并由此引发区域发展格局变动，最终趋向稳定态—均衡的区域发展格局的核心作用力^[41, 52]。由于人口和资源等发展要素在区域间的流动方向、强度和过程可被精确量化，因此这一要素流动视角的引入将能够为人地互动关键带内部的空间演化过程的作用关系机理提供定量模型分析的可能。

当前，上述理论视角在新时期人地可持续发展的背景下，将“发展”的内涵从经济增长为主延伸成为“经济—生态—社会”相协调的综合效应，这与人地互动关键带的过程和目标不谋而合。在全球环境变化、国际劳动分工以及区域发展转型的背景下，人地

互动关键带内部存在着发展失衡、人地不协调等影响人类社会福祉的巨大问题。因此,当前发展地理学的研究不断转向知识促进区域转型发展、缓解资源环境压力和实现可持续发展目标等内容^[39]。同时,人地系统可持续发展思想中也将实现空间均衡的各种效益分解为经济效益、生态效益和社会效益,强调实现区域发展格局稳定状态的必要条件是三大效益之和在区域之间的均衡^[41]。其中对于生产、分配、消费以及生活方式等人文经济过程的引入则为人地互动关键带内部空间演化的人文要素流动及其社会机制分析提供了思想基础。

3.1.3 社会—空间理论集合 人地互动关系模型可以测算人口、土地和资源等要素对于关键带的影响力水平,而社会—空间理论将为人地互动关键带的演化过程提供基于现实的、深刻的人类社会系统运行规律的解释框架。该理论体系是由列斐伏尔、哈维和索亚等学者在马克思主义空间思想基础上逐渐延续、演化发展形成,本质上是社会 and 空间之间关系的辩证法^[53-54]。其思想精髓在于,空间不仅是社会的产物,还反映和反作用于社会^[55]。宏观层面上,该理论被广泛用于分析中国现代化进程中的区域基础设施配置、区域竞争、城市新区建设和城市更新以及产业空间布局等^[56-57],用以阐释制度和资本等权力结构对地理景观和空间进行管理、规划和创造的过程^[58-59]。在该视角下,人地互动关键带中的区域发展格局可以被认为其所处的社会经济关系的空间体现。进而,可通过制度设计对空间要素资源进行重新配置,实现区域协同与设施公平。

在微观视角下,社会—空间理论思想能够使“人”在影响和塑造关键带过程中的主体性得以体现。人地互动关键带中的“人”不仅指社会权力运作系统,也包括非完全理性个体的“人”所发生的社会经济日常行为、轨迹、模式、交往以及形成的共同体^[60]。“人”主要通过行动者、社会网络以及日常生活实践实现对于空间的创造性生产,以回应政策制定者和技术专家对于空间资源进行定义、分配和利用导致的不平等以及空间的同质化^[45]。这一微观视角的引入将更有利于自下而上地分析人地互动关键带中的重要枢纽、节点或者其他小尺度地域系统形成过程中的要素流动或权力结构,通过关注特定行动者的日常生活或者基于社会网络的地方政治等社会行为,探讨空间资源、设施、景观等在相对小尺度范围内的配置过程。

3.2 人地互动关键带的研究对象、任务和技术路径

人地互动是在全球化、现代化和城市化背景下所提出的与时俱进的人地关系理念。人地互动关键带的物质空间形态、要素流动过程、相互作用网络以及社会调节机制等都来源于对人文地理学“人地互动”以及地球科学“地球关键带”两大概念体系的融合与继承。人地互动关键带的实体对象是人类和环境在多个时空尺度上的高强度交互界面。受到自然环境制约、人口聚集、开发方式与强度、资源要素的流动、生态服务价值观和环境管理差异等影响,人地互动关键带在地球表层呈现出非均质和不连续的空间特征。在此基础上,人类社会和自然环境系统中所有不同维度的要素、运行规则 and 变化过程均统一于这一物质空间(图2)。即人地互动关键带不仅是一个探讨人地如何相互作用的容器,更重要的是为其中人类和环境之间的复杂关系提供一种综合自然规律和社会规则的认识论。基于该认识,地理学家对于人地互动关键带的研究任务是:以要素流为视角,分析多尺度人地互动区域的时空演化过程、模式与规律,并在自然环境变化和社会运行的过程耦合框架下揭示其中的主体互动机制与系统效应,最终指向人地和谐、区域协同现实价值的综合地理研究。

针对人地互动关键带的多要素、多尺度和多主体特征,对其研究仍需继承地理学中格局、过程、机理与决策的科学逻辑传统^[61],延续“识别空间特征与要素类型—分析要

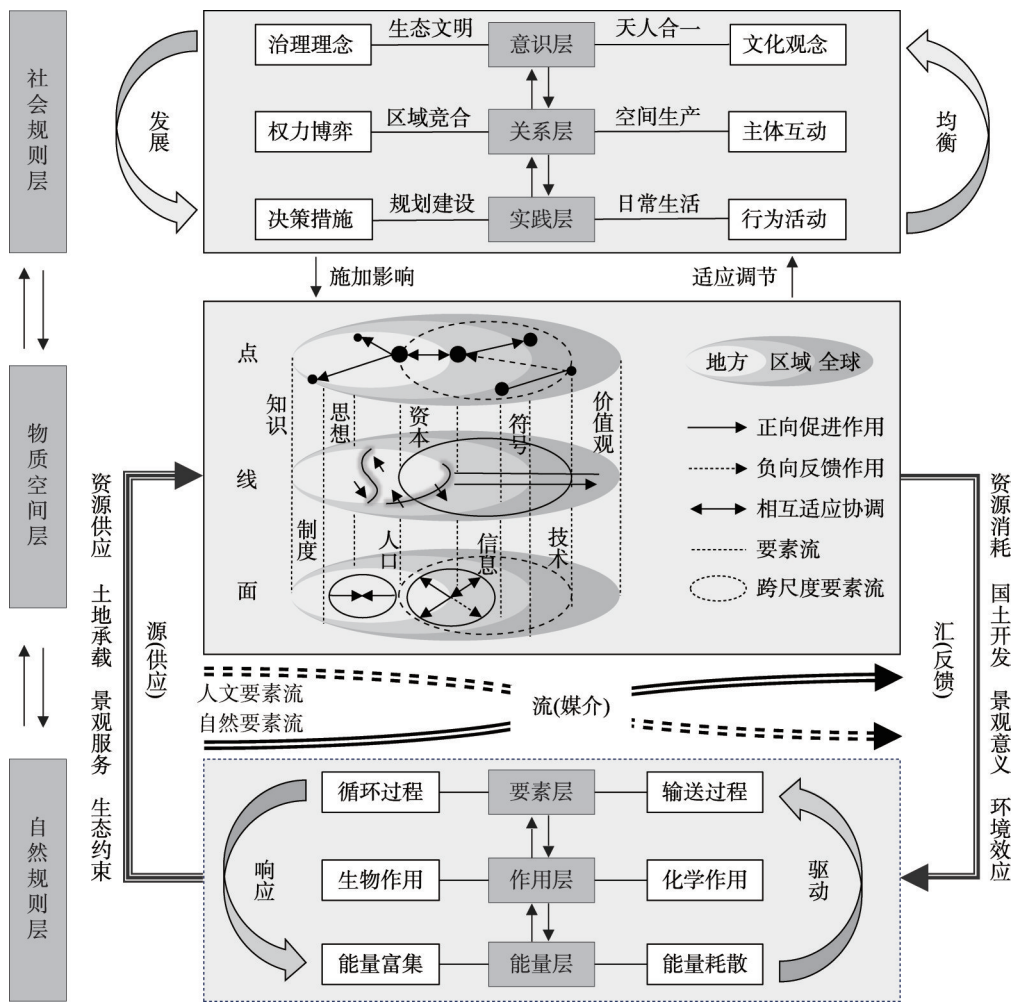


图2 人地互动关键带的理论框架探索

Fig. 2 Exploratory theoretical framework for the critical zone of human-earth interaction

素流动与格局变化—探索主体互动与社会机制—建立人地互动关键带可持续支持系统”的研究思路，进行概念体系建构、案例研究和应用系统集成，以明晰人地互动关键带演化的驱动机制，形成地理学在关键带研究的主要范式，为新时期人地和谐区域协同的高质量发展等国家重大战略需求提供科学、合理的决策支持^[62]。

3.3 人地互动关键带的理论框架探索

为更好地理解人地互动关键带在面向人地和谐区域协同的高质量发展过程中的解释力，需要针对分析参数、驱动力和因果链、系统稳定性和弹性等方面提出探索性的理论框架^[33]。地球科学领域中分析物质流动循环过程时常采用“源”“流”“汇”的概念，构成了通过物质要素的来源、去向和强度以及系统平衡状态的分析认识系统演化过程的重要框架^[63-64]。总体上，人地互动关键带研究框架中对于人地互动关系的内涵可以表征为“源—流—汇”的基本链式模型，即由垂直方向上人类与自然环境之间的供需关系和水平方向上社会经济要素在不同区域间的空间流动所构成的互嵌性循环过程^[65]。

“源”和“汇”构成了理论框架中理解人类和环境相互作用的基本因果链。“源”主要指自然环境为人类活动所需提供资源、土地、景观和生态容量的能力，即当自然环境

能够满足人类可持续发展的各项需求时,自然系统就是社会系统的“源”。“汇”主要指人类活动对于资源的消耗、土地的开发和由此引发的环境效应对自然系统造成的压力,往往需要特定的社会调节系统介入才能缓解此类压力。“流”是自然系统和社会系统之间的联系工具和平衡媒介,不仅包括传统意义上的自然和人文要素(如人口、资源、土地),也包括一切能够跨越空间、尺度和边界产生效应的其他要素(如知识、制度、思想、资本、信息、符号和价值观)等。其中所体现出的系统开放性和要素流能够在一定程度上打破静止地理空间的约束和管制,跳出以往研究中将绝对人口数量作为人类系统对环境压力的认识^[66-67]。因此,“要素流”作为分析框架中重要的分析参数,对于其类型、方向、强度等量化指标分析,可以对人地互嵌过程和耦合效应等提供重要的认识依据。

人地互动关键带理论框架的核心在于从多个维度对“流”的丰富内涵进行分解^[68-69]。首先,“流”是在区域发展势能差驱动下产生的动态过程,表现为要素的时间变化和空间流动对于关键带内区域发展格局的塑造。例如人口、资本在不同等级城市间的流动既受到发展势能差的驱动,同时也塑造着新的区域发展格局。其次,“流”是一种调节机制,通过对要素流的类型、方向和强度的社会调节可以实现区域之间的动态均衡。例如,政府对于资源和资金的转移调配能够满足不同区域的差异化发展需求,实现区域协同发展。最后,“流”是一种关联响应,不同要素的地方化嵌入过程会引发其他要素的响应,使人地系统处于稳定的循环适应过程。例如,生态文明的价值观念和制度要素的地方化实践能够引发资源、能源、产业等其他要素的联动效应,使系统处于平衡状态。可见,通过对于“流”的意义分解,以及促进要素流动的社会机制的联动,能够将人类社会的复杂运作逻辑与实践引入地球关键带科学,有助于在人类世背景下,全面、系统及客观地认识关键带科学,并有效应对当前的全球资源、环境和社会危机。

人地互动关键带的空间实体是人类社会与自然环境互动程度最剧烈的地表层,其空间尺度由人地互动的方式、强度和效应等决定^[13]。理论上,人地互动关键带的要素“流”发生在跨越地方、区域和国家边界的全球尺度,但“源”“汇”过程则是区域性人类活动的结果。这使得人地互动关键带“人”“地”“要素”之间存在空间不匹配,挑战着地理学者对于区域人地关系理解。而现实上,过去半个多世纪的全球化使跨越各类边界的地域开放性重塑了全球范围内各个空间尺度上的人文经济地理格局。全球、国家、地方、城乡之间的交流强度越来越大,人流、物流、信息流、资金流甚至制度流等人文要素流构成的流空间已经超越静止地域中的资源供应与环境响应,有望成为解释人地互动关键带的格局演化与尺度效应的关键过程^[29]。此外,数据技术上,基于遥感数据获取、网络社交大数据获取和地理信息分析能力的增强,分析人地互动关键带在不同空间尺度上的动态过程和现实结构成为可能。这不仅可以在宏观尺度上解析关键带在全球尺度的系统性网络结构,也可以从微观尺度上解释人类社会行为和社交过程的时空积累对于关键带形态和结构的塑造^[29]。可见,人地互动关键带的空间实体是许多复杂的、相互关联的“源”“流”“汇”过程在广泛的空间和时间尺度上耦合作用的结果,在具体的研究中需要根据不同的要素属性与特征,对其流动和作用过程的空间尺度进行有效识别^[70-71]。因此,在应用人地互动关键带框架进行区域分析时,需要采取不同的观测尺度、过程尺度和操作尺度,在斑块化的、异质的、不连续的地球表层系统中认识人地互动关系。

“点”“线”和“面”是人文地理学者从尺度的内涵出发刻画地球表面空间特征的重要维度。其中,点主要标示位置性和独特性;线主要从连接性、中心性和流量等地理特性出发关注网络拓扑结构中的要素流动;面主要指一种围合的空间,涉及面积大小、控制范围和权力层级等地理属性^[72]。基于这种认识,“点”“线”和“面”被认为是从人

文地理空间形态出发,分析区域发展格局、要素扩散过程以及国土空间开发时序等地理过程的抽象模式^[12, 34],可以很好地认识人地互动关键带内尺度不等、层级不同、形态各异的相互依赖、相互耦合的地理区域,能够有效弥合地方、区域和全球等跨越不同空间尺度的人地互动关键带研究。其中,“点”是一个具有控制、辐射和主导功能集合的节点,主要用于分析区域中心城市、各级居民点、中央商务区、产业集聚区等人地相互作用程度最高的关键节点。“线”是对于物质、能量、人口和信息等自然和人文要素在地方、区域内(间)和全球空间流动的路径表达,主要用于分析能够促进或阻隔要素交换的边界区域、交错地带以及多种形式的廊道等,往往是解决特定人地矛盾的突破口。“面”是由“点”和“线”相互作用而成的,综合了“生产、生活和生态”的多维度空间组织概念^[73],主要用于分析人地互动关键带在人文—自然要素作用下形成的空间结构、要素比例和格局演化(中心化、分化、极化等),其现实价值在于从要素合理流动、产业分工协作以及设施配置等空间治理视角下为促进区域空间均衡发展提供认识依据。

4 人地互动关键带的应用价值

新时期中国生态文明建设、新型城镇化与乡村振兴战略持续推进是中国式现代化的重要支撑。人地系统与国土空间治理格局正在经历着历史性变革,人地系统协调与区域发展面临的地理问题愈加复杂,促使地理学进入系统研究时代^[24, 74]。以上既是人地互动关键带的理论背景,也对人地互动关键带的实践应用提出了新的学科使命。即在总体上促进人口经济发展与资源环境相协调,在空间上促进区域间均衡协调的发展格局,在时间上形成可持续的资源与国土开发利用时序,并最终建构社会治理体系与自然环境变化之间的动态均衡。人地互动关键带的内涵与理论框架将服务于国家战略需求,并且至少在以下几个重要应用场景中,为实现可持续、高质量发展提供决策支持:

(1) 城镇化与基础设施建设:当前中国城镇化水平稳步提升,但许多城市新区、边缘区、城乡结合地带以及城中村等因空间和设施资源争夺造成物质空间混杂、社会空间分异以及发展权力不均衡等问题^[75],人地系统矛盾最为集中。科学识别和动态监测其中的全要素流动和格局演化,将有助于促进人口与区域资源环境、产业发展相匹配的城乡统筹与空间治理^[76]。

(2) 区域资源配置与公平性:推动基本公共服务均等化是实现社会公平的关键所在^[77]。当前在大都市圈、特大城市和区域性中心城市的“虹吸效应”“马太效应”影响下,边缘区域的发展要素、资源和设施投入有可能被持续削弱。厘清社会干预协调机制与主体,有助于从资源分配、监管、优化资源配置结构、区域间合作等方面促进区域均衡协调发展。

(3) 乡村振兴与城乡融合:受到长期形成的城乡二元体制的影响,乡村地区正面临劳动力短缺、经济衰退以及社会与环境退化等乡村人地系统衰落的问题^[78]。正确认识乡村系统在关键带内的“源”的作用,通过农业现代化、新兴产业布局、基建投入、治理体系重建等吸引劳动力回流与安置,以促进实现城乡间要素合理流动循环的融合式可持续发展^[79]。

(4) 生态系统保护、开发与恢复:环境污染和退化是全球性问题,但环境效应及其地方响应却具有显著的区域差异。在国土空间规划的框架下,通过对于自然保护区、国家公园以及城市绿地等生态空间规划,强化区域中自然演化系统作为“源”的供应作用;同时,通过节能减排、植树造林、河湖休养生息,耕、林、草间的科学协调等社会调节实现生态系统修复。

5 结论与讨论

人地互动关键带的概念既有重要的科学意义,又具备显著的现实意义,其理论体系与框架响应了科学研究前沿也具备显著的应用潜力。人地互动关键带的提出受到地球科学中对于“地球关键带”相关概念模型与实证应用的启发:“地球关键带”所具有的界面交互、空间异质、过程复合与动态演化的特性具有天然的地理学特征。其中,对于要素的流动和交换、时空尺度的包容以及多过程耦合的系统认识与实证研究,与人文地理学中对于地球表层人地系统的认识论不谋而合,显示出两大概念体系之间存在协同融合的理论基础。事实上,也正是因为人文地理学者们多年来对于人地关系地域系统、区域均衡发展等地理知识体系的持续耕耘,才使人地互动关键带概念得以形成和建构,并有望成为地理学中有前景、有活力、能促进分支学科对话的概念框架和分析工具。

在认识论和方法论上,人地互动关键带能够有效整合跨学科的地理实践、知识生产和数据使用模式,并应用不同领域的哲学认识差异,为理解地球表层复杂过程和模式提供系统视角。① 人地互动关键带既是一种空间载体(地表系统),也是一种空间实践模式(人地互动关系的表征)。有效应用经验数据(观测数据和社会调研)、数学描述(调查数据)以及技术数据(遥感大数据等),方能理解人地互动关键带的多维度、多尺度和多要素特征;② 人地系统的复杂性和时空关系决定了任何单一的数学模型或者社会理论都无法独立诠释人类世下的关键带演化过程。“源一流一汇”为理解人地互动关键带的过程性提供了3个阶段的认识路径,“点、线、面”则为不连续的人地互动关键带的空间异质性提供了分析工具,以便更有效地解决现实世界的问题;③ 人地互动关键带强调对“自然科学”“社会科学”的角色和责任的整合性思考,是一个兼具批判性和应用价值的概念。这一概念将在理论上有效整合地球表层自然和人文的时空过程,将人类社会的复杂运作逻辑与实践引入地球关键带科学,能够为自然、人文和信息地理学家提供了基于学科认同、面对现实问题开展合作协同发展的机会。

地理学对人地关系演变的复杂历史和现实有着深刻的理解,是塑造人类世学术未来的理想科学。人地互动关键带的概念体系并非是对地球表层系统人地关系研究的完全创新,也不能涵盖人类与环境之间相互作用的所有复杂性。为了在深入阐释人地互动的同时简化复杂性,对其应用应侧重于解决确定地理区域内的具体问题。面对全球自然环境变化和地缘经济政治挑战,以及生态文明建设背景下对于国土空间发展战略的新要求,区域间、城乡间发展不平衡、不充分的矛盾日益加剧,贫困、发展方式转型、国际贸易竞争、气候变化、环境退化等方面的危机与挑战严重制约着区域可持续发展能力,亟需在新的认识框架下利用地理学科知识指导促进产业转型发展、缓解资源环境压力、优化国土空间发展格局,以实现可持续发展目标^[9]。

诚然,本文对于人地互动关键带中的理念梳理、内涵界定和框架建构是探索性和争鸣式的,对于具体实证研究应用中的分类架构、指标体系和数据模型等操作性尚未作深入探讨。期待未来研究立足全球自然环境变化和经济政治不稳定性的挑战,以及中国生态文明建设背景下对于国土空间发展战略的新要求;通过理论和实证研究的积累,进一步完善人地互动关键带的认识论与方法论;并据此建立可持续的社会支持系统,共同助力国家科学制定空间、环境与社会发展战略,促进国土空间高质量发展并有效促进自然系统与社会系统的深度、高效协同。

参考文献(References)

- [1] Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. *Elements*, 2007, 3(5): 307-314.
- [2] National Research Council. *Basic Research Opportunities in Earth Sciences*. Washington, DC: National Academy Press, 2001.
- [3] Minor J, Pearl J K, Barnes M L, et al. Critical zone science in the Anthropocene: Opportunities for biogeographic and ecological theory and praxis to drive earth science integration. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2020, 44(1): 50-69.
- [4] Zhang Ganlin, Song Xiaodong, Wu Kening. A classification scheme for earth's critical zones and its application in China. *Scientia Sinica Terrae*, 2021, 51(10): 1681-1692. [张甘霖, 宋效东, 吴克宁. 地球关键带分类方法与中国案例研究. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(10): 1681-1692.]
- [5] Lin H. Earth's critical zone and hydopedology: Concepts, characteristics, and advances. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(1): 25-45.
- [6] Brantley S L, White T S, White A F, et al. *Frontiers in Exploration of the Critical Zone*. National Science Foundation, 2005.
- [7] Lü Y H, Hu J, Fu B J, et al. A framework for the regional critical zone classification: The case of the Chinese Loess Plateau. *National Science Review*, 2019, 6(1): 14-18.
- [8] Fan Jie. Frontier approach of the sustainable process and pattern of human-environment system. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1060-1068. [樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索. *地理学报*, 2014, 69(8): 1060-1068.]
- [9] Waters C N, Zalasiewicz J, Summerhayes C, et al. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 2016, 351(6269): aad2622. DOI: 10.1126/science.aad2622.
- [10] Richter D D Jr, Mobley M L. Monitoring earth's critical zone. *Science*, 2009, 326(5956): 1067-1068.
- [11] Elhacham E, Ben-Uri L, Grozovski J, et al. Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature*, 2020, 588(7838): 442-444.
- [12] Zhu Yongguan, Li Gang, Zhang Ganlin, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1859-1869. [朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859-1869.]
- [13] Cao Xiaoshu. The scientific logic and research trends of human critical area. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(1): 31-42. [曹小曙. 人类关键区的科学逻辑与研究趋势. *地理科学*, 2022, 42(1): 31-42.]
- [14] Chorover J, Kretzschmar R, Garcia-Pichel F, et al. Soil biogeochemical processes within the critical zone. *Elements*, 2007, 3(5): 321-326.
- [15] Arènes A. Inside the critical zone. *GeoHumanities*, 2021, 7(1): 131-147.
- [16] Amundson R, Richter D D, Humphreys G S, et al. Coupling between biota and earth materials in the critical zone. *Elements*, 2007, 3(5): 327-332.
- [17] Crutzen P J. *Geology of mankind*/Crutzen P J, Günter Brauch H. *A Pioneer on Atmospheric Chemistry and Climate Change in the Anthropocene*. Cham, Switzerland: Springer, 2016: 211-215.
- [18] Raymond C M, Singh G G, Benessaiah K, et al. Ecosystem services and beyond: Using multiple metaphors to understand human-environment relationships. *BioScience*, 2013, 63(7): 536-546.
- [19] Raymond C M, Brown G, Robinson G M. The influence of place attachment, and moral and normative concerns on the conservation of native vegetation: A test of two behavioural models. *Journal of Environmental Psychology*, 2011, 31(4): 323-335.
- [20] Yang Shunhua, Zhang Ganlin. What is the Earth's Critical Zone. *Science News*, 2021(5): 33-36, 4. [杨顺华, 张甘霖. 什么是地球关键带? *科学新闻*, 2021(5): 33-36, 4.]
- [21] Chen Qi, Wang Xiaodan, Xia Yan, et al. Research on the evaluation method of the ecosystem services of Earth's Critical Zone. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2022, 58(6): 1070-1086. [陈琪, 王晓丹, 夏炎, 等. 地球关键带生态系统服务评价方法研究. *南京大学学报(自然科学)*, 2022, 58(6): 1070-1086.]
- [22] Purser R E, Park C, Montuori A. Limits to anthropocentrism: Toward an ecocentric organization paradigm? *Academy of Management Review*, 1995, 20(4): 1053-1089.
- [23] Siebe C. Human impact on geospheric processes in the critical zone exemplified by the regional water exchange between the Mexico City Metropolitan Area and the Mezquital Valley. *Franklin Humanities Institute of Duke University*, 2018.

- [24] Yao Shimou, Chen Shuang, Nian Fuhua, et al. Utilization & protection of water resources during urbanization. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(1): 22-28. [姚士谋, 陈爽, 年福华, 等. 城市化过程中水资源利用保护问题探索: 以长江下游若干城市为例. *地理科学*, 2008, 28(1): 22-28.]
- [25] Liu Yansui, Feng Weilun, Li Yurui. Modern agricultural geographical engineering and agricultural high- quality development: Case study of loess hilly and gully region. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2029-2046. [刘彦随, 冯巍仑, 李裕瑞. 现代农业地理工程与农业高质量发展: 以黄土丘陵沟壑区为例. *地理学报*, 2020, 75(10): 2029-2046.]
- [26] Johnston R J. Resource analysis, resource management and the integration of physical and human geography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1983, 7(1): 127-146.
- [27] Hoffman A J, Sandelands L E. Getting right with nature: Anthropocentrism, ecocentrism, and theocentrism. *Organization & Environment*, 2005, 18(2): 141-162.
- [28] Wu Chuanjun. On the research core of geography: Territorial system of human-environment interaction. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1-6. [吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, 11(3): 1-6.]
- [29] Fan Jie. "Territorial System of Human-environment Interaction": A theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 597-607. [樊杰. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. *地理学报*, 2018, 73(4): 597-607.]
- [30] Fang Chuanglin. Recent progress of studies on man-land relationship and its prospects in China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(Suppl.1): 21-32. [方创琳. 中国人地关系研究的新进展与展望. *地理学报*, 2004, 59(Suppl.1): 21-32.]
- [31] Li Xiaoyun, Yang Yu, Liu Yi. The evolution process and its mechanism of man-land relationship in China. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1495-1514. [李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系的历史演变过程及影响机制. *地理研究*, 2018, 37(8): 1495-1514.]
- [32] Liu Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221-1234. [刘彦随. 现代人人地关系与人地系统科学. *地理科学*, 2020, 40(8): 1221-1234.]
- [33] Han Maoli, Zhang Yi, Fang Chen, et al. Location and environment of the settlements and man-land relationship in West Liaohe River Basin since Holocene. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1118-1128, 1225. [韩茂莉, 张一, 方晨, 等. 全新世以来西辽河流域聚落环境选择与人地关系. *地理研究*, 2008, 27(5): 1118-1128, 1225.]
- [34] Cheng Yu, Wang Yaping, Zhang Yuze, et al. The evolution trend and driving factors of man-land relationship about the Yellow River Delta area. *Economic Geography*, 2017, 37(2): 83-89, 97. [程钰, 王亚平, 张玉泽, 等. 黄河三角洲地区人地关系演变趋势及其影响因素. *经济地理*, 2017, 37(2): 83-89, 97.]
- [35] Li Xiaoyun, Yang Yu, Liu Yi. Research progress in man-land relationship evolution and its resource-environment base in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2067-2088. [李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展. *地理学报*, 2016, 71(12): 2067-2088.]
- [36] Li Xiaoyun, Yang Yu, Liu Yi, et al. The systematic structure and trend simulation of China's man-land relationship until 2050. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(2): 187-197. [李小云, 杨宇, 刘毅, 等. 中国人地关系的系统结构及2050年趋势模拟. *地理科学*, 2021, 41(2): 187-197.]
- [37] Song Changqing, Cheng Changxiu, Yang Xiaofan, et al. Understanding geographic coupling and achieving geographic integration. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 3-13. [宋长青, 程昌秀, 杨晓帆, 等. 理解地理“耦合”实现地理“集成”. *地理学报*, 2020, 75(1): 3-13.]
- [38] Harden C P. Framing and reframing questions of human-environment interactions. *Annals of the Association of American Geographers*, 2012, 102(4): 737-747.
- [39] Zheng Du. Prospects of studies on man-land relationship in the 21st century. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 9-13. [郑度. 21世纪人地关系研究前瞻. *地理研究*, 2002, 21(1): 9-13.]
- [40] Cai Yunlong. A paradigm of the research on man- earth relationship: Positive study of territorial system. *Human Geography*, 1998, 13(2): 11-17. [蔡运龙. 人地关系研究范型: 地域系统实证. *人文地理*, 1998, 13(2): 11-17.]
- [41] Glaser M, Krause G, Ratter B M, et al. New Approaches to the Analysis of Human-Nature Relations//Glaser M, Krause G, Ratter B M, et al. Human-Nature Interactions in the Anthropocene: Potentials of Social-ecological Systems Analysis. London: Routledge, 2012: 3-12.
- [42] Lu Dadao. Theoretical studies of man-land system as the core of geographical science. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 135-145. [陆大道. 关于地理学的“人—地系统”理论研究. *地理研究*, 2002, 21(2): 135-145.]
- [43] Yang Yu, Li Xiaoyun, Dong Wen, et al. Comprehensive evaluation on China's man-land relationship: Theoretical model and empirical study. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1063-1078. [杨宇, 李小云, 董雯, 等. 中国人地关系综合评

- 价的理论模型与实证. 地理学报, 2019, 74(6): 1063-1078.]
- [44] Dong Guanghui, Qiu Menghan, Li Ruoyu, et al. Using the Fulcrum Cognitive Model to explore the mechanism of past human-land co-evolution. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 15-29. [董广辉, 仇梦晗, 李若, 等. 探讨过去人地关系演变机制的“支点”概念模型. 地理学报, 2021, 76(1): 15-29.]
- [45] Sun Jing, Wang Jun, Yang Xinjun. An overview on the resilience of social-ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5371-5381. [孙晶, 王俊, 杨新军. 社会—生态系统恢复力研究综述. 生态学报, 2007, 27(12): 5371-5381.]
- [46] Tyler N J C, Turi J M, Sundset M A, et al. Saami reindeer pastoralism under climate change: Applying a generalized framework for vulnerability studies to a sub-arctic social-ecological system. *Global Environmental Change*, 2007, 17(2): 191-206.
- [47] Yin Sha, Yang Xinjun, Chen Jia. Progress of research on adaptation of human-environment systems: Concepts, theoretical frameworks, and methods. *Progress in Geography*, 2021, 40(2): 330-342. [尹莎, 杨新军, 陈佳. 人地系统适应性研究进展: 概念、理论框架与方法. 地理科学进展, 2021, 40(2): 330-342.]
- [48] Song Shuang, Wang Shuai, Fu Bojie, et al. Study on adaptive governance of social-ecological system: Progress and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2401-2410. [宋爽, 王帅, 傅伯杰, 等. 社会—生态系统适应性治理研究进展与展望. 地理学报, 2019, 74(11): 2401-2410.]
- [49] Deng Xiangzheng, Jin Gui, He Shujin, et al. Research progress and prospect on development geography. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(2): 226-239. [邓祥征, 金贵, 何书金, 等. 发展地理学研究进展与展望. 地理学报, 2020, 75(2): 226-239.]
- [50] Deng Xiangzheng, Liang Li, Wu Feng, et al. Chinese balanced regional development strategy from the perspective of development geography. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(2): 261-276. [邓祥征, 梁立, 吴锋, 等. 发展地理学视角下中国区域均衡发展. 地理学报, 2021, 76(2): 261-276.]
- [51] Fan Jie. The scientific foundation of major function oriented zoning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(4): 339-350. [樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. 地理学报, 2007, 62(4): 339-350.]
- [52] Fan Jie, Zhao Hao, Guo Rui. The new trend and coping strategies of regional development gap in China. *Economic Geography*, 2022, 42(1): 1-11. [樊杰, 赵浩, 郭锐. 我国区域发展差距变化的新趋势与应对策略. 经济地理, 2022, 42(1): 1-11.]
- [53] Ye Chao. The origins of socio-spatial dialectic. *Studies in Dialectics of Nature*, 2012, 28(2): 56-60. [叶超. 社会空间辩证法的由来. 自然辩证法研究, 2012, 28(2): 56-60.]
- [54] An Ning, Qian Junxi. The literary writing of China's urbanization in the post-reform era: A socio-spatial dialectical analysis on the Chronicle of Zhali. *Human Geography*, 2017, 32(1): 47-54, 89. [安宁, 钱俊希. 城市化的文学书写: 基于社会—空间辩证法的《炸裂志》解析. 人文地理, 2017, 32(1): 47-54, 89.]
- [55] Wang Fenglong, Liu Yungang. A review of researches on the production of space. *Human Geography*, 2011, 26(2): 13-19, 30. [王丰龙, 刘云刚. 空间的生产研究综述与展望. 人文地理, 2011, 26(2): 13-19, 30.]
- [56] Harvey D. *The Limits to Capital*. London and New York: Verso, 2006: 25.
- [57] Harvey D. *The Urbanization of Capital: Studies in the History and Theory of Capitalist Urbanization*. Oxford: Blackwell, 1985.
- [58] Liu Yungang, Yin Guanwen. Local government-oriented city making in inland China: A case study of Hebi, a mining city. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 887-896. [刘云刚, 殷冠文. 地方政府主导的土建城市化: 以鹤壁市为例. 地理科学进展, 2010, 29(7): 887-896.]
- [59] Follmann A, Kennedy L, Pfeffer K, et al. Peri-urban transformation in the Global South: A comparative socio-spatial analytics approach. *Regional Studies*, 2023, 57(3): 447-461.
- [60] Zhang Wenjia, Lu Damin. The methodology of behavioral geography and its research paradigm of microscale human-environment relationships. *Progress in Geography*, 2022, 41(1): 27-39. [张文佳, 鲁大铭. 行为地理学的方法论与微观人地关系研究范式. 地理科学进展, 2022, 41(1): 27-39.]
- [61] Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932. [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. 地理学报, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [62] Lin Zhihui, Liu Xianfeng, Chen Ying, et al. Water-food-energy nexus: Progress, challenges and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1591-1604. [林志慧, 刘宪锋, 陈瑛, 等. 水—粮食—能源纽带关系研究进展与展望. 地理学报, 2021, 76(7): 1591-1604.]
- [63] Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress

- and prospects. *Science China Terrae*, 2022, 52(6): 1010-1020. [朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(6): 1010-1020.]
- [64] Piao Shilong, Yue Chao, Ding Jinzhi, et al. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the 'carbon neutrality' strategy. *Science China Terrae*, 2022, 52(7): 1419-1426. [朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(7): 1419-1426.]
- [65] 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. *Progress in Geography*, 2021, 40(6): 1060-1072. [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. *地理科学进展*, 2021, 40(6): 1060-1072.]
- [66] Van H H, Olivier T K, Wolfgang Z B. *Ordering Space*. Aldershot: Ashgate, 2005.
- [67] Hummel D. Population dynamics and adaptive capacity of supply systems//Glaser M, Krause G, Ratter B M, et al. *Human-Nature Interactions in the Anthropocene: Potentials of Social-ecological Systems Analysis*. London: Routledge, 2012: 141-156.
- [68] Shen Wencheng, Li Peiqing, Yao Wenwen, et al. The structural characteristics and spatial organization pattern of China's urban network based on the multiple flow. *Geographical Research*, 2023, 42(2): 514-533. [沈文成, 李培庆, 姚雯雯, 等. 多重流空间视角下的中国城市网络空间结构特征及组织模式. *地理研究*, 2023, 42(2): 514-533.]
- [69] Liao Chuangchang, Li Xiaoming, Hong Wuyang, et al. Multi-dimensional measurement of network structure of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from the perspective of traffic flows space. *Geographical Research*, 2023, 42(2): 550-562. [廖创场, 李晓明, 洪武扬, 等. 交通流空间视角下粤港澳大湾区网络结构多维测度. *地理研究*, 2023, 42(2): 550-562.]
- [70] Lv Yihe, Fu Bojie. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2096-2105. [吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12): 2096-2105.]
- [71] Zhang Qipeng, Wang Qian, Zhang Chunhua, et al. On the scale and scale effect of geography. *Journal of Gansu Normal Colleges*, 2020, 25(2): 38-40. [张起鹏, 王倩, 张春花, 等. 论地理学的尺度与尺度效应. *甘肃高师学报*, 2020, 25(2): 38-40.]
- [72] Wang Fenglong, Liu Yungang. An analytical framework of scale based on second abstraction. *Human Geography*, 2015, 30(1): 9-15. [王丰龙, 刘云刚. 尺度概念的演化与尺度的本质: 基于二次抽象的尺度认识论. *人文地理*, 2015, 30(1): 9-15.]
- [73] Fan Jie, Zhou Kan, Sun Wei, et al. Scientific values and research innovations of human-economic geography in construction of ecological civilization. *Progress in Geography*, 2013, 32(2): 147-160. [樊杰, 周侃, 孙威, 等. 人文—经济地理学在生态文明建设中的学科价值与学术创新. *地理科学进展*, 2013, 32(2): 147-160.]
- [74] Song Changqing, Zhang Guoyou, Cheng Changxiu, et al. Nature and basic issues of geography. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(1): 6-11. [宋长青, 张国友, 程昌秀, 等. 论地理学的特性与基本问题. *地理科学*, 2020, 40(1): 6-11.]
- [75] Han Wei, Cai Jianming, Zhao Yifu. Structure, mechanism, and paths of spatial governance in metropolitan fringe with the participation of multi-subjects. *Progress in Geography*, 2021, 40(10): 1730-1745. [韩伟, 蔡建明, 赵一夫. 多元主体视角下大城市边缘区空间治理结构、机制及路径研究. *地理科学进展*, 2021, 40(10): 1730-1745.]
- [76] Liang Chen, Zeng Jian. Three-dimensional dynamic identification and spatial evolution mechanism of urban-rural fringe: A case study of Xiamen. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1404-1420. [梁晨, 曾坚. 城乡交错带的三维动态识别及空间演变机制: 以厦门市为例. *地理研究*, 2021, 40(5): 1404-1420.]
- [77] Tao Zhuolin, Dai Teqi, Song Changqing. Improving spatial equity-oriented location-allocation models of urban medical facilities. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(2): 474-489. [陶卓霖, 戴特奇, 宋长青. 空间公平导向的城市医疗设施优化配置模型研究. *地理学报*, 2023, 78(2): 474-489.]
- [78] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside. *Nature*, 2017, 548(7667): 275-277.
- [79] Yang Yiming, Wang Jian, Wu Qun. Mechanism of influence of element flow on urban-rural integrated development in China. *Progress in Geography*, 2022, 41(12): 2191-2202. [杨一鸣, 王健, 吴群. 中国城乡实体要素流动对城乡融合发展的影响机制研究. *地理科学进展*, 2022, 41(12): 2191-2202.]

Exploring the connotation and research framework of the critical zone of human-earth interaction

YANG Rong^{1,2,3}, YUAN Zhenjie^{1,2,3}, YIN Duo^{1,2,3}, ZHU Hong^{1,2,3}

(1. Center for Human Geography and Urban Development, School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Center for Urban and Migration Studies, Guangzhou 510006, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, Guangdong, China)

Abstract: "The Earth's Critical Zone" is a cutting-edge concept proposed in response to the global challenges entailed by sustainable development. Geographers have developed various analytical tools and methods to shed light on the functional structure and dynamic evolution of the global critical zones. However, these analysis methods primarily focus on the perspective of geographical element circulation and material exchange. The intricate interactions between human activities, societal systems, and Earth Critical Zones remain unclear. This article begins by tracing the origins of the Earth's Critical Zone concept before expanding its reach by combining the theoretical knowledge and understanding of human-Earth relations acquired from the regional development experiences of Chinese geographers. In the context of globalization, modernization, and urbanization, the development of human society has become intricately intertwined with the Earth's surface system, involving extensive links based on fundamental mechanisms, interaction patterns, and processes. The concept of the "critical zone of human-earth interaction" is introduced to better comprehend these interactions. A theory with the kernel as "source-flow-confluence" is established for the critical zone of the human-earth interaction concept. The theory of critical zone of human-earth interaction effectively integrates the temporal and spatial processes of the surface of the Earth's natural and humanistic elements in research perspectives. It establishes the link between the intricate operational logic, societal practices, and the existing theoretical framework of the Earth's critical zone. The theory of critical zone of human-earth interaction will help geographers better interpret the development pattern and process of the critical zones. This theory could help the government scientifically formulate spatial, environmental, and social development policies, supporting the high-quality usage of national land resources and the efficient symbiosis of natural and social systems.

Keywords: the Earth's Critical Zone; critical zone of human-earth interaction; human-earth interaction; theoretical framework; Anthropocene