

关键带科学的深化与拓展: 多圈层耦合与滨海系统研究的新方向

陈德亮

清华大学地球系统科学系, 北京 100084

E-mail: deliangchen@tsinghua.edu.cn

Deepening and expanding critical zone science: new directions for multi-sphere coupling and coastal system research

Deliang Chen

Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

E-mail: deliangchen@tsinghua.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-5559](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5559)

地球表层系统正处在全球变化与人类活动的双重驱动之下。气候变暖引发的极端事件频发、土地利用的快速变化以及水土资源的过度开发,使得传统的学科分割式研究难以应对日益复杂的环境问题。在这种背景下,科学界迫切需要新的综合性框架来揭示自然过程与人类社会之间的多重耦合关系^[1,2]。

地球关键带科学正是这一需求的产物。其研究范围覆盖从植被冠层顶部至基岩界面或地下含水层底部的完整剖面,强调水、土、气、生、岩的相互作用^[1]。关键带不仅是物质循环和能量流动的舞台,也是人类赖以生存的生态系统服务的提供地。例如,它调节水文循环、控制碳氮收支,并影响食物供给和气候反馈^[3-5]。因此,对关键带的研究既具有科学探索的价值,也与社会福祉和可持续发展紧密相关。

然而,长期以来关键带研究多集中于内陆系统,对滨海区域关注不足。滨海地区是地球表层系统中最为敏感和脆弱的区域之一,既是陆海相互作用的前沿地带,也是人类活动最为密集的地区。该区域在全球气候变化背景下面临海平面上升、盐度入侵、风暴潮增强和湿地退化等多重威胁,同时还承担着固碳、净水、减灾、防护和维系生物多样性等关键功能。滨海地球关键带科学的提出,正是对这一现实问题的回应^[2]。它不仅在学科层面拓展了关键带科学的边界,也为生态保护与综合治理提供了系统性的新路径。

刘丛强团队提出了“结构-过程-功能-服务”的地球关键带科学系统研究框架^[1],强调从结构出发,探索多圈层交互作用的过程,解释功能的形成机制,并与人类社会服务相联系。突破了单要素研究的局限性,使研究能够在跨尺度和跨过程的背景下展开,推动了学科由描述性走向预测性^[6]。地球关键带科学突出跨学科整合的特征,打破了地质学、水文学、土壤学、生态学和大气科学之间的壁垒,形成了一个综合体系^[4,5],强调从分子到全球、从秒级到百万年的多尺度研究方法。通过观测、实验和模拟的结合,形成了“多圈层-多过程-多尺度”的研究框架。这一方法学突破,有助于弥合学科间割裂,推动定量化和预测性研究。关键带观测网络的建设是其重要亮点,目前全球60余个长期观测站构成覆盖多气候区和地貌单元的网络,并通过国际协作(CZNet)推动区域性研究向全球化合作发展^[6,7],推动了关键带科学正从区域性研究迈向全球化合作,为揭示普适性规律提供了可能。

滨海地球关键带科学的提出具有开创性意义,其明确界定了滨海地球关键带的垂向和水平边界^[1],涵盖从植被冠层到滨海基岩界面,以及受潮汐和海洋动力作用影响的地下水系统。这一界定凸显了滨海系统的多圈层交互特征,填补了关键带科学中长期忽视滨海系统的空白。其延续“结构-过程-功能-服务”框架,突出陆海耦合及城市化背景下的结构-功能联系,为滨海系统演变机制提供理论支撑^[1,2]。在明确滨

引用格式: 陈德亮. 关键带科学的深化与拓展: 多圈层耦合与滨海系统研究的新方向. 科学通报, 2025, 70: 5404-5406

Chen D. Deepening and expanding critical zone science: new directions for multi-sphere coupling and coastal system research (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5404-5406, doi: [10.1360/CSB-2025-5559](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5559)

海地球关键带的边界与功能特征后,研究者进一步提出了五大优先研究方向,以指导未来科学探索和环境治理:结构演化、结构-过程耦合、功能与服务、滨海城市关键带、生态系统恢复与管理^[1]。同时强调多学科融合与陆海统筹,推动观测、模拟与管理结合,形成系统科学的新研究范式^[1,2]。

地球关键带科学及滨海地球关键带科学在学科拓展、研究框架、方法应用和实践指向等方面展现出系统性创新,彰显了该领域在理论构建与应用实践上的前沿价值。学科拓展方面,前者突破传统学科界限,构建跨学科整体体系^[4,5];后者进一步纳入长期被忽视的滨海系统^[1],增强了覆盖广度与现实价值。研究框架方面,地球关键带科学提出“结构-过程-功能-服务”范式^[5,6],并在此基础上强调“深时”(追溯地质时间尺度上的长期过程,理解自然演化的历史背景)、“深度”(突破浅层土壤研究,将范围延伸至基岩深部)、“深耦合”(揭示生物-非生物过程间的复杂交互作用)等核心理念;滨海科学在此基础上强化陆海交互与人地关系^[1,2],揭示复杂系统规律。在方法应用方面,两者均强调遥感、地球物理、长期监测与数值模拟^[6-8],滨海科学进一步引入滨海适用技术与模型集成,提升跨尺度研究能力。在实践指向方面,前者服务碳循环、水资源与生态评估^[1],后者面向碳中和、滨海城市风险治理与生态修复^[2],实现理论与社会需求的紧密结合。

跨学科深度融合是未来地球系统科学研究的必然趋势。关键带科学的发展历程显示,单一学科难以揭示复杂系统的内在规律。未来研究必须进一步打破自然科学内部壁垒,并将社会科学纳入其中,实现对“人-地系统”的整体认知^[9]。滨海地球关键带科学尤其强调,在人类活动高度集中的区域,自然科学与社会科学的结合对于政策制定和风险治理的重要性^[1,2]。

长期观测与模型模拟的结合是研究的核心。关键带系统演化往往具有非线性与长期性,只有依托连续观测网络和高分辨率模型,才能揭示其对极端气候和人类扰动的响应^[7,8]。

滨海系统的复杂性使这一需求更加迫切,其研究必须依赖长期观测与模拟相结合的综合方法^[1]。已有研究表明,面向地球关键带建设的观测站体系在推动地球表层科学发展方面具有不可替代的作用,其长期累积效益在于支持发展能够反映多圈层复杂反馈过程的综合地球系统模型^[10]。

未来,滨海城市关键带研究应受到更多关注。随着城市化加速,滨海生态系统结构与功能显著重塑,对社会影响日益突出,探索城市发展与生态保护协调路径成为关键任务^[1,2]。研究需聚焦生态系统服务与人类福祉,尤其是滨海湿地和河口在固碳、净水与减灾中的作用,并加强生态功能量化、价值评估与政策转化,为生态补偿与可持续资源管理提供科学依据^[2,11,12]。

最后,全球视野与国际合作不可或缺。关键带科学已形成国际化的观测与研究网络^[7,8],而滨海地球关键带研究对象更是跨越自然与国界^[2]。未来只有通过跨国合作、标准统一与数据共享,才能建立普适性规律与预测能力,推动全球范围内的可持续发展与生态安全^[10,11]。

综上所述,地球关键带科学与滨海地球关键带科学在理论建构、方法创新和实践应用方面均具有重要突破。地球关键带科学通过提出“结构-过程-功能-服务”的范式,为表层地球系统研究提供了完整的逻辑框架^[3-5,7];滨海地球关键带科学则进一步拓展了学科边界,聚焦陆海交互与人类活动叠加下的复杂过程^[1,2],开辟了新的研究领域。两者结合,不仅深化了对普适规律的理解,也揭示了区域差异性与实践需求,为全球变化科学与可持续发展战略提供了新的科学范式。

未来,随着观测技术与模拟方法的进步,以及跨学科与国际合作的加强,关键带科学将在应对气候变化、推动生态修复和实现可持续发展目标方面发挥更加重要的作用^[11,12]。滨海地球关键带科学的提出,标志着关键带研究进入了新的阶段,它不仅是学科发展的自然延伸,也是人类社会应对全球挑战的必然选择。

致谢 感谢中国科学院青藏高原研究所李新老师的帮助和清华大学项目(100008001)的支持。

参考文献

- 1 Liu C Q, Chen C, Yan Z, et al. Earth Critical Zone science and global change research (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 5483–5497 [刘丛强, 陈春梅, 晏智锋, 等. 地球关键带科学与全球变化研究. 科学通报, 2025, 70: 5483–5497]
- 2 Liu C Q, Song Z, Song C, et al. The coastal Critical Zone sciences: an emerging research area (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 5498–5514 [刘丛强, 宋照亮, 宋长春, 等. 滨海地球关键带科学: 一个新兴的研究领域. 科学通报, 2025, 70: 5498–5514]
- 3 NRC (National Research Council). Basic Research Opportunities in Earth's Critical Zone. Washington DC: National Academy Press, 2001
- 4 Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. Crossing disciplines and scales to understand the Critical Zone. *Elements*, 2007, 3: 307–314
- 5 Lin H. Earth's Critical Zone and hydopedology: concepts, characteristics, and advances. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2010, 14: 25–45
- 6 Arora B, Kuppel S, Wellen C, et al. Building Cross-Site and Cross-Network collaborations in critical zone science. *J Hydrol*, 2023, 618: 129248
- 7 Giardino J R, Chris H. Principles and Dynamics of the Critical Zone. Amsterdam: Elsevier, 2015

- 8 Banwart S, Menon M, Bernasconi S M, et al. Soil processes and functions across an international network of Critical Zone Observatories: introduction to experimental methods and initial results. [Comptes Rendus Géoscience](#), 2012, 344: 758–772
- 9 Reid W V, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: grand challenges. [Science](#), 2010, 330: 916–917
- 10 Bogen H R, White T, Bour O, et al. Toward better understanding of terrestrial processes through long-term hydrological observatories. [Vadose Zone J](#), 2018, 17: 1–10
- 11 Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al. IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- 12 Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity. [Nature](#), 2009, 461: 472–475