

DOI:10.11766/trxb202211230640

杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 吴克宁, 张甘霖. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J]. 土壤学报, 2023

YANG Shunhua, SONG Xiaodong, WU Huayong, WU Kening, ZHANG Ganlin. A Review and Discussion on the Earth's Critical Zone

Research: Status Quo and Prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023

地球关键带研究评述: 现状与展望*

杨顺华¹, 宋效东¹, 吴华勇¹, 吴克宁^{2,3}, 张甘霖^{1,4,5†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 3. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 4. 中国科学院流域地理学重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 210008; 5. 中国科学院大学现代农业科学学院, 北京 100049)

摘要: 近 20 年来, 国际上兴起的“地球关键带”研究, 为重新审视地球表层系统内水、土、气、生、岩等各要素的功能及其内在关联提供了新思路。通过搜集 2001—2021 年间国内外地球关键带研究, 应用引文空间(CiteSpace)技术进行文献计量分析, 梳理地球关键带的研究历史与现状, 为自然资源综合管理和国土空间生态修复提供理论依据和决策支持。文献分析表明: 地球关键带受到欧美发达国家和中国学界的普遍关注; 三个发展阶段(萌芽、初期和快速发展)的研究重点差异明显; 土壤是联结地表和地下过程的纽带与核心; 地球物理技术成为理解地球关键带结构与过程的重要工具; 联网观测和模型模拟是下一阶段的重要方向; 地球关键带功能和服务的量化、权衡与提升有望成为重要的决策支持工具。未来仍需在五个方面深化研究: 加强基础设施建设, 构建更具包容性的地球关键带观测站网络; 加强学科交叉和人才队伍建设, 培养新一代地球关键带科学家; 服务面向可持续发展的社会需求, 在实践中应用和发展地球关键带科学; 开发新技术、新方法, 完善理论、模型和方法体系; 揭示地球关键带过程的耦合机制及其环境效应, 加强人类活动对水土过程、物质循环与能量交换影响的研究。

关键词: 地球关键带; 土壤圈; 地球表层系统; 结构; 过程; 服务

中图分类号: S151

文献标志码: A

A Review and Discussion on the Earth's Critical Zone Research: Status Quo and Prospect

YANG Shunhua¹, SONG Xiaodong¹, WU Huayong¹, WU Kening^{2,3}, ZHANG Ganlin^{1,4,5†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Nature Resources, Beijing 100035, China; 4. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. College of Advanced Agricultural Sciences, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* 自然资源部课题(“地球关键带与自然资源管理战略研究”)、国家重点研发计划项目(2021YFD1500202)、国家自然科学基金项目(42107334)和中国博士后科学基金(2021TQ0337, 2021M703305)资助 Supported by the Ministry of Natural Resources Project ("Research on Earth's Critical Zone and Natural Resource Management Strategies"), the National Key R&D Program of China (No.2021YFD1500202), the National Natural Science Foundation of China (No.42107334), and the China Postdoctoral Science Foundation (Nos.2021TQ0337, 2021M703305)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 杨顺华(1990-), 男, 湖南永州人, 博士, 特别研究助理, 主要从事地球关键带、数字土壤制图和土壤地理研究。E-mail: shyang@issas.ac.cn

收稿日期: 2022-11-23; 收到修改稿日期: 2023-02-13; 网络首发日期(www.cnki.net):

Abstract: In the past twenty years, the emerging and rising of the "Earth's Critical Zone" study has provided a new perspective for re-examining the functions of water, soil, air, life, rock and their intrinsic interactions in earth's surface system. By collecting relevant researches on Earth's Critical Zone from 2001~2021 at home and abroad, we conducted a bibliometric analysis using CiteSpace. We introduced the history and current status of Earth's Critical Zone research, in order to provide a theoretical and decision-making support for the comprehensive management of natural resources and ecological restoration of territorial space. The results show that: (i) Earth's Critical Zone have received widespread academic attention from developed countries in Europe, the United States and China; (ii) The research priorities are obviously different among the three stages (i.e. germination, early and rapid development stage); (iii) Soil is the link and core connecting surface and underground processes; (iv) Geophysical technology has become an important tool for understanding the structure and processes of Earth's Critical Zone; (v) Networked observations and model simulations are important directions in the next stage; (vi) The quantification, trade-off, and improvement of functions and services in Earth's Critical Zone are expected to become important decision-support tools. In the future, there is still a need to strengthen research aimed at (i) Boosting infrastructure construction and building a more collaborative network of Earth's Critical Zone observatory; (ii) Construction of interdisciplinary research and talent teams and training new generations of critical zone scientists; (iii) Serving the social needs of sustainable development, apply and develop the Earth's Critical Zone science in practice; (iv) Developing new technologies and methods, and improve theories, models and methodological systems; (v) Revealing the coupling mechanisms of the Earth's Critical Zone processes and their environmental effects, and strengthen the research on the impacts of human activities on water and soil processes, material cycles and energy exchange.

Key words: Earth's Critical Zone; Pedosphere; Earth surface system; Structure; Processes; Service

1 地球关键带的定义与科学内涵

自工业革命以来,以城市化、工业化和全球化为代表的人类活动以前所未有的强度和速率重塑了地表格局^[1]。这一“大加速”^[2]引发的水土资源退化、生物多样性锐减等资源环境问题明显降低了地球宜居性^[3, 4],威胁着人类社会的可持续发展^[5]。地球表层系统是地球宜居性的重要载体,为人类生存提供水、食物、纤维和能源等基础资源^[6],对于生态系统服务的持续供给具有关键作用^[4, 7]。为了实现联合国提出的可持续发展目标^[4, 5],需要深入理解地球表层系统的现状,并预测其动态变化。

地球关键带是地球表层系统研究的实体操作框架^[9],被定义为岩石-土壤-水-大气-生物发生复杂相互作用并调控自然生境和决定生命可持续资源有效性的异质性近地表环境,包括从植被冠层到地下水底部以下未风化基岩面的连续体域^[10]。如图 1 所示,在地球关键带中,物质和能量在大气圈、生物圈、土壤圈、水圈和岩石圈交汇的区域中循环和流动,涉及构造运动、风化、流体运移和生物活动等四个主要过程^[10]。这些相互耦合的过程,通过提供生态系统服务的方式维持人类的生存和发展^[11]。

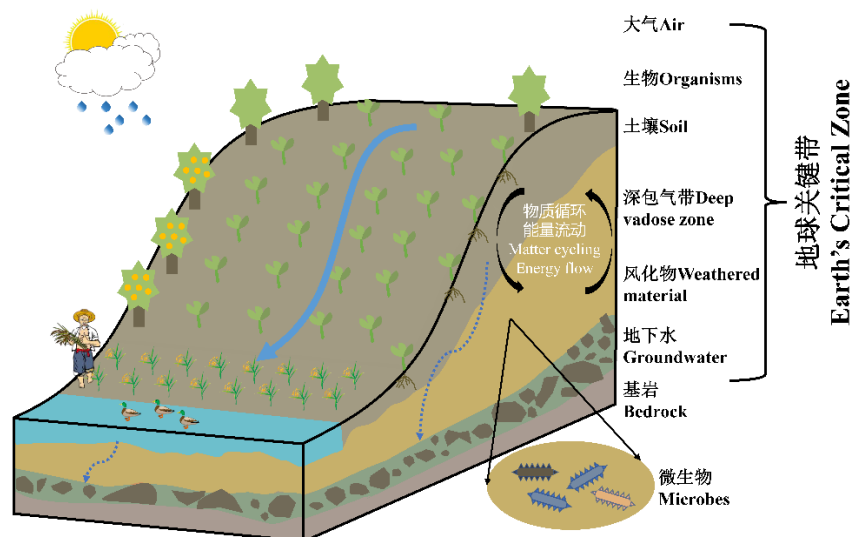


图 1 坡面尺度的地球关键带结构示意图^[8]

Fig. 1 A sketch showing the structure of Earth's Critical Zone at the hillslope scale

地球关键带研究大致经历了三个发展阶段：萌芽阶段（2001—2006 年）、初期阶段（2007—2017 年）和快速发展阶段（2018—2021 年）。萌芽阶段，美国国家研究理事会发布 *Basic research opportunities in Earth Science* 报告^[10]（图 2），将地球关键带确立为 21 世纪地球科学的优先发展领域。初期阶段，美国建立了首批 3 个地球关键带观测站（CZO）^[12]，主要任务是基础设施的建设和对科学问题的凝练^[13-15]，阶段性总结了地球关键带观测站项目实施十年以来取得的重要认识和学术成果^[16]。快速发展阶段，发文数量、速率、涉及的学科与相关学术会议数量以及载文期刊类别均攀升至历史高位。

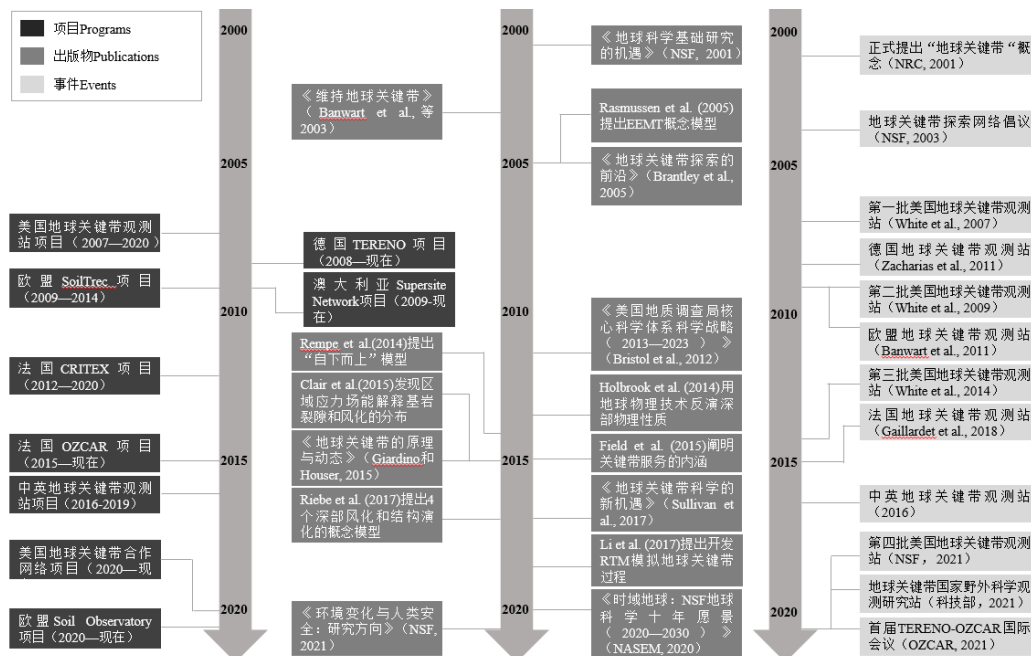


图 2 地球关键带研究的历史演变（2001—2021）

Fig. 2 A brief history of Earth's Critical Zone Science from 2001 to 2021

2 地球关键带研究的文献计量分析

为提升对地球关键带研究的系统性认识,本文对2001—2021年间的相关研究进行文献计量分析,梳理了地球关键带研究的发展历史;概述了地球关键带分类、结构与过程、模型模拟以及地球关键带服务等方面的主要进展;最后,探讨了该领域的未来发展思路。

2022年2月25日,参照李小雁和马育军^[17]以及Lin^[18]的方法,在Web of Science(WoS)中,选择核心合集数据库(不含CNKI数据库),以“((TS=("critical zone")) AND PY=(2001-2021)) AND DT=(Article)”为检索式进行文献检索,逐条审核、排除与地球关键带研究内容或范围无关的论文(例如,物理化学、油气成藏、医学等研究中也有“critical zone”表述但与目标主题无关),最终得到952篇相关文献。

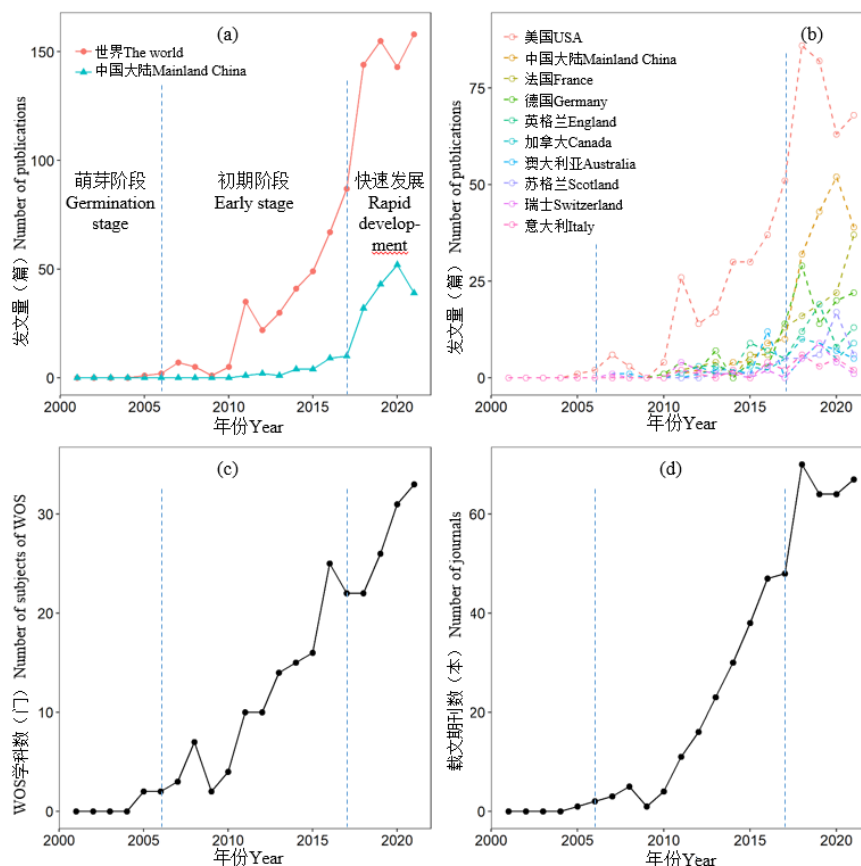
根据发文数量的变化趋势和研究主题的变化,划分出3个阶段(图3(a)):萌芽阶段(2001—2006年)、初期阶段(2007—2017年)和快速发展阶段(2018—2021年)。国内的研究在2016年之后才开始快速发展,原因可能是中英重大国际合作研究计划“地球关键带中水和土壤的生态服务功能维持机理研究”开始产出成果。发文总量排名前三的国家/地区分别是美国(520篇)、中国大陆(197篇)、法国(130篇)、德国(122篇)和英格兰(83篇)(图3b)。得益于率先提出地球关键带的概念^[10]和建立地球关键带观测站^[12]以及持续稳定的资助,美国的发文量始终保持领先地位。我国在2018年跃居第二,法国和德国紧随其后,原因可能是有相关项目资助。

涉及的学科门类从4门(2010年)快速增加至33门(2021年);载文期刊从4个增加至67个(图3c,图3d)。发文量位列前五的学科分别是Water Resources(311篇)、Geosciences Multidisciplinary(310篇)、Environmental Sciences(302篇)、Geochemistry Geophysics(159篇)和Soil Science(151篇);前五的期刊分别是Water Resources Research(55篇)、Hydrological Processes(50篇)、Vadose Zone Journal(45篇)、Chemical Geology(40篇)和Journal of Hydrology(37篇),五者载文量占总量的24%。上述结果表明,学科交叉是地球关键带研究的显著特点^[19],水资源和包气带研究是其重点研究对象^[20]。

图4a显示共有258个机构参与发文。发文量最大的五个机构依次是宾州州立大学(Penn State Univ, 117篇)、中国科学院(Chinese Acad Sci, 115篇)、中国科学院大学(Univ Chinese Acad Sci, 63篇)、亚利桑那大学(Univ Arizona, 59篇)和科罗拉多大学(Univ Colorado, 42篇)。宾州州立大学的中介中心性(0.53)最强,处于核心地位;中国科学院的发文量大,但中介中心性低(0.09),说明与其他单位合作关系弱。前5%的机构(13家)发文量占总量的45%,说明少数研究机构强力推动了地球关键带科学的发展。图4b表示共有423位作者的文章被引用,其中影响力最大的五位作者依次是Brantley SL(305次)、Anderson SP(169次)、White AF(119次)、Lin H(118次)和Riebe CS(101次)。Anderson SP的中介中心性最强(0.27),表明其具有广泛的合作关系。前5%的作者被引频次占总量的58%,且网络明显聚集,说明作者被引频次分布较为集中。

图5a是引文共被引关系图谱,反映的是该领域的知识基础和研究重点。共被引频次高的文献包括:(1)Riebe等^[21](62次)提出了四个关于地球关键带深部风化和结构演化的概念模型;(2)Clair等^[22](44次)使用地震波和电阻调查表征地球关键带地下结构,发现区域应力场能够解释基岩裂隙和风化的空间分布;(3)Rempe和Dietrich^[23](40次)提出了一个“自下而上”的基岩风化定量模型。共有604篇文献存在共被引关系,主要关注岩石风化、结构演化和过程模拟等内容。图5b是关键词共现关系图谱,反映的是研究热点和发展动向。土壤是地球关键带最核心的部分,而水是物质循环和能量交换的驱动力。共有439个关键词,出现频次最高的五个关键词依次是“soil”(土壤,125次)、“critical zone”(关键带,92

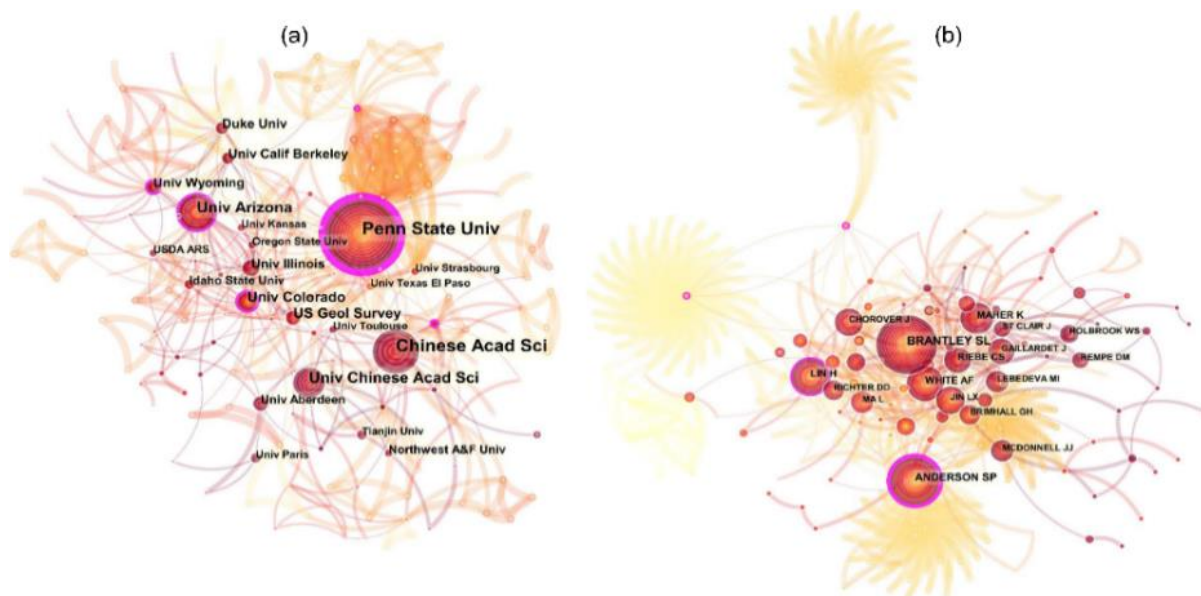
次)、“model”(模型, 84次)、“water”(水, 81次)和“climate”(气候, 69次), 说明水土过程及其对气候变化的响应和模型模拟是该领域的研究热点。“water”的中介中心性最高(0.23), 印证了“水是地球关键带各组成部分的纽带”的论述^[24]。前5%的关键词共现次数占总量的58%。



注: (a) 国际和中国大陆的英文发文量变化曲线; (b) 发文量前十名国家/地区的英文发文量变化曲线; (c) 地球关键带相关研究涉及的 Web of Science 学科数变化趋势; (d) 地球关键带相关研究涉及的载文期刊数变化趋势。Note: (a) The number of publications from the world and mainland China; (b) The number of publications from the top 10 countries or regions; (c) The number of WOS categories; (d) The number of journals.

图 3 地球关键带相关研究的发文情况统计

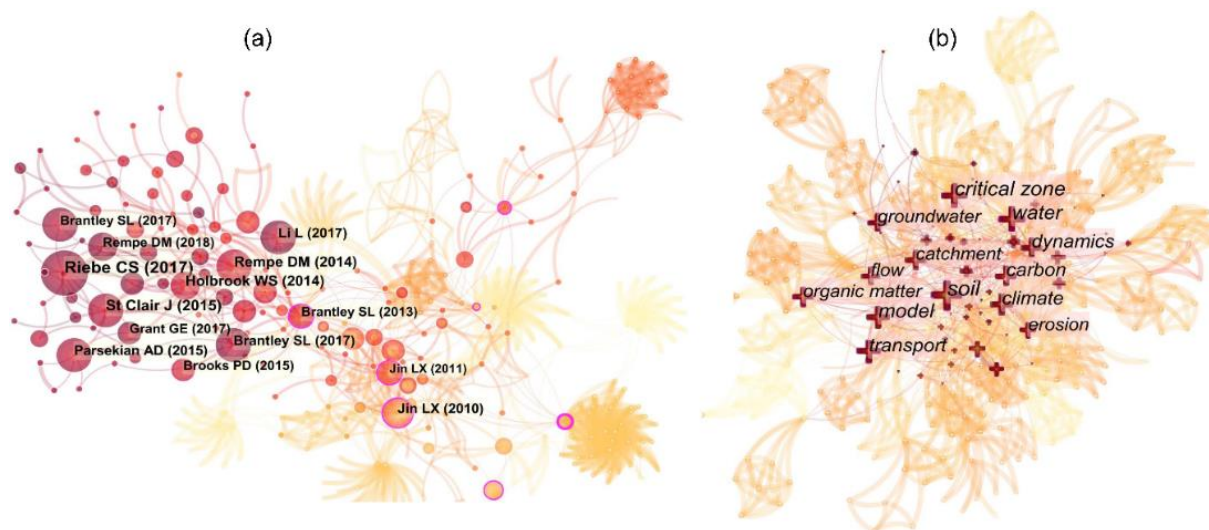
Fig. 3 Statistics for publications on Earth's Critical Zone



注：节点圆环的半径越大表示发文量（被引用量）越大；最外圈紫色圆环的厚度越大，表示节点在网络中的中介中心性（重要性）越大；节点之间的连线表示两者存在共现或共被引关系，线条粗细反映关系的强弱；颜色的深浅程度与时间呈正相关。下同。Note: The larger the radius of the node, the greater the amount of publications (or citations); The greater the thickness of the outermost purple node, the greater the centrality (importance) of the node in the network; The connection between the nodes indicates that there is a co-occurrence or co-citation relationship between the two, and the thickness of the line reflects the strength of the relationship; the shade of the color is positively correlated with time. The same as below.

图 4 地球关键带领域发文机构 (a) 和被引作者 (b) 图谱

Fig. 4 A network map for institutions (a) and cited authors (b) of Earth's Critical Zone publications



注：括号内数字代表年份。为了清晰美观，删除了少量不影响结果的节点。Note: The numbers in the parentheses are the publication year. For clarity, some nodes with weak importance were not shown.

图 5 地球关键带领域引文共被引 (a) 和关键词 (b) 图谱

Fig. 5 A network map for co-citation (a) and keywords (b) of Earth's Critical Zone publications

3 当前地球关键带研究的主要科学问题及研究重点

当前,地球关键带研究遵循“结构-过程-功能-服务”的研究范式^[16,25],围绕地球关键带分类、结构表征、过程模拟以及服务与决策支持等主要科学问题和研究重点^[26],已经取得了一系列重要进展。

3.1 地球关键带分类

相对于垂直方向上的更为清晰的定义,不同类型的地球关键带在水平维度上并没有明确的边界。尽管目前有关地球关键带分类的理论与实践案例不多^[9,27],但是作为地球关键带研究的基础,它对于认识和管理地球关键带过程具有重要的意义^[16]。2019年,Lü等^[27]提出了一套基于地多样性、生态系统、气候、人类和社会经济指标的区域尺度地球关键带分类方案,对于理解黄土高原关键带的空间异质性、观测站规划选址和过程模拟的尺度转换具有参考作用。但是,如何优化使用更多的分类信息,进行地球关键带类型的多级分类值得进一步探讨。张甘霖等^[9]利用气候、成土母质、土壤类型、地下水深度等环境要素构建了中国地球关键带的三级分类方案。可以预见,随着地球关键带研究的深入和对其认识的加深,地球关键带分类将获得显著的发展,并成为地球表层系统自然资源管理的重要工具。

3.2 地球关键带结构

地球关键带的地下结构及其形成机制是当前的研究重点之一^[22]。从研究手段来看,传统的直接钻井观测法正在快速被以地球物理技术为代表的间接观测技术替代,包括探地雷达、电阻层析成像^[28]、地震波^[22]和电磁感应反演。越来越多的研究将地球关键带结构与其过程和演化机制联系起来^[29]。尽管如此,由于地下结构的空间异质性较强,且需要钻孔数据校正,尺度拓展时仍具有较大的局限性。因此,在区域乃至全球尺度上,通常采用基于环境变量辅助的模型预测地球关键带的地下厚度^[30]。总体来看,有关地球关键带地下结构与过程耦合的认识依然很不充分,如地球关键带的下边界定义依然模糊,若地下环境中存在多个层级的含水层^[31],则地球关键带的底部界线难以界定;地球物理技术在不同生境,尤其是碳酸盐岩地区的反演能力有待进一步验证^[32]。出现这些局限的原因可能是地球物理技术的实用性有待验证,对地下结构认识的不足限制了结构演化模型的发展。

3.3 地球关键带过程的模型模拟

地球关键带过程涉及水、土、气、生、岩等要素,当前的研究中既有单一要素,又有多要素耦合,如水和溶质的运移与转化、土壤形成与演化、气体迁移与转化、微生物活动、岩石风化、地貌演化、植物和微生物与土壤和水文的相互作用等^[33-35]。模型模拟是过程认识的延伸与拓展。目前地球关键带模型大致可以分为数据驱动^[36]和问题(过程)驱动两类。数据驱动类模型利用数据挖掘方法,寻找数据之间的潜在关系,实现“知识发现”的目的^[37-38]。但由于过度依赖于“大数据”、变量关系和预测过程类似“黑箱操作”,这类方法尚存争议^[39]。问题驱动类模型通常基于已有的研究认识和特定的研究假设进行模型设计,然后用实测数据加以校正和验证^[15],最后进行模拟和预测。例如 Reactive Transport Models (RTMs)模型^[40-41]通过综合或者单独地定量模拟地球表层系统的各种物理、化学和生物过程,评价系统对外部压力的响应^[40]。其他代表性模型还有 Effective Energy and Mass Transfer (EEMT)^[41]、Dhara 模型^[42]、Terrestrial Integrated Modeling System^[43]、LandscapeDNDC^[44]。这些模型通常涉及多要素过程耦合,在不同时空尺度的适用性、多过程耦合的兼容性等方面仍需要进一步验证。

随着人们对地球关键带过程认识的加深,如何运用模型集成、挖掘、模拟和预测这些数据资源成为一种高阶的研究方法。可靠的模型不仅能够验证科学假设,还能通过参数的调节预测未来情景下过程的动态变化,为应对地球表层系统的变化提供决策依据。但是,现有模型多基于特定情景、面向特定流域、耦合有限过程或要素,面向水、土、气、生、岩定量关

系的多元耦合模型仍然欠缺，并且对于耦合的内在机制和机理的认识依然不足。

3.4 地球关键带服务与决策支持

地球关键带之所以“关键”在于它为几乎所有陆地生命提供了生存的资源与环境^[10]，而这些都是通过其内部的物质循环、能量流动和信息传递等功能，以地球关键带服务的形式供给陆地生命^[45-46]。地球关键带服务可以分为供给、支持、调节和文化服务等四个方面^[46]。如何刻画和评估地球关键带服务的货币或非货币价值仍然是一个充满挑战的议题。地球关键带服务与生态系统服务具有诸多相似点^[47]，很多情况下两者几乎相等。但是，地球关键带服务具有其自身的独特性，并具有较生态系统更长的演化时间尺度^[48]。Field 等^[46]通过扩展生态系统服务内涵的方法定义了地球关键带服务，使用“supply chain（供应链）”的概念来识别地球关键带服务供应的限制因素（如土壤形成和水文分割的速率），认为量化地球关键带过程可以作为评价地球关键带服务货币或非货币价值的重要手段。但是，随着气候变化和人类活动的加剧，地球关键带过程对这些变化的响应、地球关键带服务在外界干扰下的演化、如何有效利用和管理关键带中的各种自然资源（如森林资源^[49]、水土资源^[20]）以及如何量化、权衡与提升其服务能力仍然是一个充满挑战的任务^[50]。

4 当前地球关键带研究的优点、特色与不足

4.1 优点与特色

地球关键带研究的一个主要优点是相对清晰地划定了地球表层系统的边界，指出其上、下边界分别是树冠顶层和岩石-土壤风化界面，强调用系统的思想开展跨学科和跨尺度的综合研究，提倡整体大于部分之和的理念^[19]。地球关键带过程涉及的时间尺度从瞬息之间到地质时间尺度，因而对很多过程的研究依赖于长期定位观测^[14]。例如，研究土壤和水对气候变化和土地利用变化的影响，需要观测二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、水等物质的通量变化等指标。基于此，在全球范围内建立了一系列基于特定目标和标准的地球关键带观测站^[13,51]，形成了一批以流域为基本单元的研究成果^[16]。

地球关键带科学研究的一个重要特点是“深时（Deep time）”、“深度（Deep depth）”与“深耦合（Deep coupling）”^[52]，强调地表过程在多时空尺度的深度综合。“深时”强调过去的演化、当前的状态与功能以及未来情景三者之间的联系；“深度”强调了地球关键带的空间范围，是地表环境及过程的延伸与深化；“深耦合”意味着不同过程之间高度耦合嵌套，是调控地球关键带服务和管理的核心。地球关键带科学的另一个重要特点是跨学科性^[19,53]。地球关键带包含水、土、气、生、岩等多个要素，只有多学科的参与才有可能突破单一学科的局限性，获得系统性认识。

4.2 不足

地球关键带研究尚存在如下不足：（1）虽然全球已经建立了一系列跨越不同环境梯度（如气候、土地利用、地形地貌、基岩和土壤类型）的观测研究台站^[12]，并产出了相应的学术成果，但这些台站多面向特定生境^[20]（如森林、耕地、喀斯特、城郊），在区域或者更大尺度上的代表性尚显不足，不同台站之间的联系也需加强；（2）缺乏统一的地球关键带演化与功能的理论框架^[54]，限制了模型和观测技术的发展；（3）对地球关键带过程耦合的内在规律及其对外界环境的响应机制认知不足，尤其在人类世的背景下，还难以预测这些过程的动态变化^[55-56]；（4）已有地球关键带研究成果的实践运用仍不够充分，尤其应该加强现有成果在资源环境问题突出区域的应用；（5）当前地球关键带科学研究的学科交叉程度仍然不够^[19]，专门人才储量不足。

5 地球关键带研究的未来发展思路

5.1 加强基础设施建设, 构建更具包容性的地球关键带观测站网络

地球关键带观测站是开展地球关键带研究的重要基础设施,它的主要作用是在充分理解地球关键带过程的基础上,预测地球关键带对全球变化和人类活动的响应,以制定相宜的适应策略。因此,必须要有足够数量的观测站,才有可能实现这个目标。未来可以从4个方面着手强化:一是充分利用已有的观测站,构建统一标准的数据库,持续积累相关的要素观测资料;二是按照地球关键带研究的需求改造已有的生态系统观测站,如CERN、ChinaFlux;三是遵循独特性、典型性和必要性的原则,新建一批观测站,如荒漠-绿洲区、盐碱地、城市、热带岛屿和青藏高原;四是设立国家级观测协调平台,开展联网观测,加强数据质量控制、推动数据标准化和开放共享,便于进行观测网中数据、方法和模型的区域对比研究,并统一规划长期观测战略。

5.2 加强学科交叉与人才队伍建设, 培养新一代地球关键带科学家

任何学科的发展均离不开人才提供动力^[57]。地球关键带科学的一个重要特点是多学科性,地球科学中面向单一要素的学科已经难以独立解决地球关键带中涌现的复杂问题。未来可从如下几个方面加强人才队伍建设:首先,在国家和部门层面持续稳定地资助地球关键带项目,促进不同学科的科研人员协同解决地球关键带科学中的问题;其次,推动地球关键带的研究成果进入中学-大学-研究生-博士后教育体系,培养学生用系统性的思维理解和分析地球科学问题;第三,面向政府、农民和企业等利益相关团体普及地球关键带知识,形成利于学科发展的社会氛围;最后,利用地球关键带科学解决实际的社会问题,将人才培养和社会发展深度绑定,为学科发展注入实践动力。

5.3 服务面向可持续发展的社会需求, 在实践中应用和发展地球关键带科学

当前,我国正面临水土流失、水资源消耗过度、土壤污染、资源配置不协调等一系列资源环境问题,严重制约着经济社会的可持续发展。地球关键带的研究理念与山水林田湖草沙冰的系统性思想高度重合,可为自然资源的分类、调查、监测和评价提供借鉴,促进自然资源的有效管理和国土空间生态修复。比如,东北黑土地正面临着土壤有机质下降、地下水位下降、土壤侵蚀、土壤深层硝酸盐积累和防护林配置失当等生态系统退化难题,严重影响国家粮食安全和区域生态可持续性。建立黑土关键带观测站,加强各要素观测,系统研究地球关键带内水、土、能量等要素的运移和转化机制,创新黑土关键带演化的理论,可为黑土退化修复提供扎实数据支撑和科学依据。作为我国生态安全屏障的青藏高原,生态系统脆弱,面临着冰川消融带来的冰川退缩、湖泊扩张、径流增加以及气候变化和人类活动双重影响下的土壤侵蚀、草场沙化等问题。运用地球关键带科学的原理,加强青藏高原不同区域重点要素的监测与评价,可为持续发挥其生态安全屏障功能提供理论和决策依据。此外,华北平原地下水“漏斗”、西南喀斯特石漠化生态修复、西北内陆水资源短缺、南方红壤侵蚀与酸化、长江中下游地区水土资源污染、“三区四带”(青藏高原生态屏障区、黄河重点生态区、长江重点生态区、东北森林带、北方防沙带、南方丘陵山地带、海岸带)的生态系统保护修复、碳达峰碳中和、国土空间规划等问题,也为地球关键带科学的发展提供了实践课题。

5.4 开发新技术、新方法, 完善理论、模型与方法体系

地球关键带研究涉及自然要素多、学科广,亟需使用新理论、新技术和新方法,可从五个方面努力:第一,借鉴土壤发生学说^[58],发展或提出地球关键带演化理论^[54]。第二,对传统单一要素或过程问题研究中已经广泛使用的方法、技术和模型进行评估,拓展其研究对象和范畴,使其延伸至地球关键带研究领域,如“生态系统服务”^[47]延伸至“地球关键带服务”^[46]、数字土壤制图^[37]延伸至数字地球关键带制图^[30]。第三,对现有技术进行模块化组装,如将成

熟的地上观测技术（如卫星遥感、探空气球、通量塔、涡度相关观测）与地下观测技术（如探地雷达、地下传感器、蒸渗仪）组合达到综合观测的目的，又如将现有的水文模型、土壤侵蚀模型和岩石风化模型进行组装使用，实现多要素耦合的研究^[59]。第四，开发新的观测技术与方法，例如法国 CRITEX 项目从实用、研究和科学三个层面分别开发了一系列适用于地球关键带研究的新技术与新方法^[60]。最后，未来还需继续发展尺度转换的方法体系，便于成果的大范围验证与应用。例如，Wolf 等^[61]在 TERENO-preAlpine 观测站，不仅按照海拔梯度布置了长期定位观测装置进行原位观测，还用高时空频率的观测活动（如卫星遥感、探空气球）进行大范围的补充观测。

5.5 揭示地球关键带过程的耦合机制及其环境效应

在观测和描述现象的基础上，需要加强地球关键带过程耦合的内在机制及其环境效应的研究，并回答在未来情景下“怎么办”的问题。首先，要继续加强对单要素的过程研究，揭示其行为的内在驱动机制，例如土壤形成和岩石风化的速率及其驱动机制。其次，还要系统研究多要素耦合的内在机制，例如元素生物地球化学循环与水循环的耦合机制。第三，对地下深部微生物介导的地球关键带过程的认识仍然很不充分^[16]。第四，社会经济因素（如产业结构、人口状况等）与地球关键带过程的相互作用仍需进一步研究。第五，地球关键带碳储量估算及岩石风化与源汇效应。现有的关于陆地生态系统碳储量的研究多以地下 1 m 土体为载体，诸如“地球关键带碳储量是多少？封存机制如何？”这类问题仍然没有明确的答案，以碳酸盐岩为代表的岩石产生或消耗大气二氧化碳的均衡关系及其环境效应仍然不清楚。因此，地球关键带响应全球气候变化及其碳封存的机制仍然有待研究。第六，典型地球关键带结构的观测与表征。结构是元素循环和能量流动的物质基础，应加强对结构的理解，厘清结构与生物地球化学过程相互作用的机理。第七，克服当前地球关键带研究主要以小流域为研究单元的不足，开展向中尺度和大尺度拓展和转换的研究。第八，建立地球关键带服务指标评价体系，权衡并提升地球关键带服务水平。第九，在充分认识过程耦合内在机制的基础上，要开展未来气候变化和人类活动干预情景下的模拟研究。这些机理性和情景模拟研究，有助于决策部门理解地球表层系统的响应特征，判断系统的发展趋势，制定合理的响应政策。最后，进入人类世以来，人类活动对地球关键带中水土过程、物质循环和能量交换的影响日益加剧^[62-64]，未来也需加强这方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] Jaramillo F, Destouni G. Comment on “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet”[J]. *Science*, 2015, 348: 1217-1217.
- [2] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene[J]. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180.
- [3] Zhu R X, Hou Z Q, Guo Z T, et al. Summary of “the past, present and future of the habitable Earth: Development strategy of Earth science”[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(35): 4485-4490. [朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 等. 宜居地球的未来——地球科学发展战略概要[J]. *科学通报*, 2021, 66(35): 4485-4490.]
- [4] Zhang G L, Wu H Y. From “problems” to “solutions” : Soil functions for realization of sustainable development goals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 124-134. [张甘霖, 吴华勇. 从问题到解决方案: 土壤与可持续发展目标的实现[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 124-134.]
- [5] Fu B J. UN sustainable development goals and historical mission of geography[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(13): 19-24. [傅伯杰. 联合国可持续发展目标与地理科学的历史任务[J]. *科技导报*, 2020, 38(13): 19-24.]
- [6] Banwart S, Chorover J, Sparks D, et al. Sustaining Earth’s Critical Zone[R]. Report of the

- International Critical Zone Observatory Workshop Delaware, USA. 2012.
- [7] Easterling W E. Climate change and the adequacy of food and timber in the 21st century[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19679.
- [8] Yang S H, Zhang G L. What is the Earth's Critical Zone? [J]. Kexue, 2021, 73(5): 33-36+4. [杨顺华, 张甘霖. 什么是地球关键带? [J]. 科学, 2021, 73(5): 33-36+4.]
- [9] Zhang G L, Song X D, Wu K N. A classification scheme for Earth's Critical Zones and its application in China[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64(10): 1709-1720. [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[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(10): 1681-1692.]
- [10] National Research Council. Basic research opportunities in earth science[M]. Washington, D.C.: National Academy Press, 2001.
- [11] Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, et al. Soil processes and functions in critical zone observatories: Hypotheses and experimental design[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(3): 974-987.
- [12] White T, Brantley S, Banwart S, et al. The role of critical zone observatories in critical zone science[M]//Developments in Earth Surface Processes. Amsterdam: Elsevier, 2015: 15-78.
- [13] Brantley S L, McDowell W H, Dietrich W E, et al. Designing a network of critical zone observatories to explore the living skin of the terrestrial Earth[J]. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(4): 841-860.
- [14] Brantley S L, DiBiase R A, Russo T A, et al. Designing a suite of measurements to understand the critical zone[J]. Earth Surface Dynamics, 2016, 4(1): 211-235.
- [15] Duffy C , Shi Y, Davis K, et al. Designing a suite of models to explore critical zone function[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 10: 7-15.
- [16] Sullivan P L, Wymore A S, McDowell W H, et al. New opportunities for critical zone science[R]. Arlington, 2017.
- [17] Li X Y, Ma Y J. Advances in Earth's Critical Zone science and hydrogeology[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016, 52(6): 731-737. [李小雁, 马育军. 地球关键带科学与水文土壤学研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 731-737.]
- [18] Lin H. Earth's critical zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(1): 25-45.
- [19] Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone[J]. Elements, 2007, 3(5): 307-314.
- [20] Zhang G, Zhu Y, Shao M. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(11): 1716-1718. [张甘霖, 朱永官, 邵明安. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 1945-1947.]
- [21] Riebe C S, Hahm W J, Brantley S L. Controls on deep critical zone architecture: A historical review and four testable hypotheses[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(1): 128-156.
- [22] St Clair J, Moon S, Holbrook W S, et al. Geophysical imaging reveals topographic stress control of bedrock weathering[J]. Science, 2015, 350(6260): 534-538.
- [23] Rempe D M, Dietrich W E. A bottom-up control on fresh-bedrock topography under landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(18): 6576-6581.
- [24] Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1060-1070. [张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1060-1070.]

- [25] Banwart S A, Bernasconi S M, Blum W E H, et al. Chapter one - Soil functions in earth's critical zone: Key results and conclusions//Steven A B, Donald L S. *Advances in Agronomy*[M]. Academic Press. 2017, 142: 1-27.
- [26] Gaillardet J, Braud I, Hankard F, et al. OZCAR: The French network of critical zone observatories[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-24.
- [27] 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[J]. *National Science Review*, 2019, 6(1): 14-18.
- [28] Tao M, Chen X, Cheng Q B, et al. Evaluating the joint use of GPR and ERT on mapping shallow subsurface features of Karst critical zone in southwest China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2022, 21(1): e20172.
- [29] Song X D, Wu H Y, Hallett P D, et al. Paleotopography continues to drive surface to deep-layer interactions in a subtropical Critical Zone Observatory[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 175: 103987.
- [30] Xu X L, Liu W. The global distribution of Earth's critical zone and its controlling factors[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(7): 3201-3208.
- [31] Goderniaux P, Davy P, Bresciani E, et al. Partitioning a regional groundwater flow system into shallow local and deep regional flow compartments[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2274-2286.
- [32] Martin J B, Covington M, Toran L, et al. Carbonate Critical Zone Research Coordination Network Workshop Report[R]. Virginia: Karst Waters Institute, Leesburg, 2021.
- [33] Li Z K, Li X Y, Zhou S, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(11): 2105-2138. [李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 65(11): 2083-2114.]
- [34] van der Meij W M, Temme A J A M, Lin H S, et al. On the role of hydrologic processes in soil and landscape evolution modeling: Concepts, complications and partial solutions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1088-1106.
- [35] Hahm W J, Riebe C S, Lukens C E, et al. Bedrock composition regulates mountain ecosystems and landscape evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3338-3343.
- [36] Bui E N. Data-driven Critical Zone science: A new paradigm[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 587-593.
- [37] McBratney A B, Mendonça Santos M L, Minasny B. On digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 2003, 117(1/2): 3-52.
- [38] Wadoux A M J C, Román-Dobarco M, McBratney A B. Perspectives on data-driven soil research[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(4): 1675-1689.
- [39] Baveye P C. "Data-driven" versus "question-driven" soil research[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13159.
- [40] Li L, Maher K, Navarre-Sitchler A, et al. Expanding the role of reactive transport models in critical zone processes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 165: 280-301.
- [41] Rasmussen C, Troch P A, Chorover J, et al. An open system framework for integrating critical zone structure and function[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1): 15-29.
- [42] Le P V V, Kumar P, Valocchi A J, et al. GPU-based high-performance computing for integrated surface-sub-surface flow modeling[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 73: 1-13.

- [43] Niu G Y, Troch P A, Paniconi C, et al. An integrated modelling framework of catchment-scale ecohydrological processes: 2. The role of water subsidy by overland flow on vegetation dynamics in a semi-arid catchment[J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 815-827.
- [44] Haas E, Klatt S, Fröhlich A, et al. LandscapeDNDC: A process model for simulation of biosphere-atmosphere-hydrosphere exchange processes at site and regional scale[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 615-636.
- [45] Banwart S A, Nikolaidis N P, Zhu Y G, et al. Soil functions: Connecting earth's critical zone[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, 47: 333-359.
- [46] Field J P, Breshears D D, Law D J, et al. Critical zone services: Expanding context, constraints, and currency beyond ecosystem services[J]. *Vadose Zone Journal*, 2015, 14(1): vzj2014.10.0142.
- [47] Alcamo J, Bennett E M. *Ecosystems and human well-being: A framework for assessment*[M]. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [48] Vitousek P, Chadwick O, Matson P, et al. Erosion and the rejuvenation of weathering-derived nutrient supply in an old tropical landscape[J]. *Ecosystems*, 2003, 6(8): 762-772.
- [49] Kopp M, Alving D, Blackman T, et al. Perspectives: Critical zone perspectives for managing changing forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 528: 120627.
- [50] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *A vision for NSF Earth Sciences 2020-2030: Earth in time*[R]. Washington, D C: The National Academies Press, 2020.
- [51] Fu B J, Zhao W W, et al. *Frontiers of physical geography*[M]. Beijing: Science Press, 2021. [傅伯杰, 赵文武, 等. *自然地理学前沿*[M]. 北京: 科学出版社, 2021.]
- [52] Guo L, Lin H. Critical zone research and observatories: Current status and future perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(9): 1-14.
- [53] Bogaen H, Schulz K, Vereecken H. Towards a network of observatories in terrestrial environmental research[J]. *Advances in Geosciences*, 2006, 9: 109-114.
- [54] Zapata-Rios X, McIntosh J, Rademacher L, et al. Climatic and landscape controls on water transit times and silicate mineral weathering in the critical zone[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6036-6051.
- [55] Kumar P, Le P V V, Papanicolaou A N T, et al. Critical transition in critical zone of intensively managed landscapes[J]. *Anthropocene*, 2018, 22: 10-19.
- [56] Goddérís Y, Brantley S L. Earthcasting the future critical zone[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2013, 1: 000019.
- [57] Wymore A S, West N R, Maher K, et al. Growing new generations of critical zone scientists[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(14): 2498-2502.
- [58] Jenny H. *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1941.
- [59] Zhu Q, Castellano M J, Yang G S. Coupling soil water processes and the nitrogen cycle across spatial scales: Potentials, bottlenecks and solutions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 248-258.
- [60] Read T, Bour O, Selker J S, et al. Active-distributed temperature sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(5): 3706-3713.
- [61] Wolf B, Chwala C, Fersch B, et al. The Scalex campaign: Scale-crossing land surface and boundary layer processes in the Tereno-preAlpine observatory[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(6): 1217-1234.
- [62] 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[J]. *Progress in*

- Physical Geography: Earth and Environment, 2020, 44(1): 50-69.
- [63] Aguilar R G, Owens R, Giardino J R. The expanding role of anthropogeomorphology in critical zone studies in the Anthropocene[J]. Geomorphology, 2020, 366: 107165.
- [64] Sullivan P L, Billings S A, Hirmas D, et al. Embracing the dynamic nature of soil structure: A paradigm illuminating the role of life in critical zones of the Anthropocene[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 225: 103873.

(责任编辑: 檀满枝)