

基于文献计量的地球关键带研究态势分析*

王立伟**¹ 张志强^{1,2} 安培浚¹ 刘文浩¹

(1. 中国科学院兰州文献情报中心, 兰州 730000; 2. 中国科学院成都文献情报中心, 成都 610041)

摘要: 地球关键带自2001年由美国国家研究理事会(NRC)正式提出后,美国、南非、中国和欧盟等国家和地区相继组织和部署了地球关键带研究项目,制定相关的研究计划,同时,建设了长期野外观测网络站点,以加强和促进地球关键带研究。本文基于SCIE文献数据库中2001~2015年与地球关键带研究相关的论文、研究综述和学术会议论文等分析发现:近15年,国际地球关键带研究论文总体呈增长趋势,并存在较大的波动;美国及美国研究机构在地球关键带研究的论文数量方面占绝对优势,中国研究机构的研究实力仍需进一步提高;从研究热点变化来看,各主要国家和机构所共同且最为关注的研究主题为关键带、水文学、土壤等;此外,跨学科研究已成为地球关键带研究的重要组织模式之一。最后,结合我国实际,提出了未来我国应该重点开展的4个研究方向。

关键词: 文献计量学; 地球关键带; 地球科学; 发展态势; 分析

中图分类号: P901 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2017.03.015

Bibliometrical Analysis of Earth Critical Zone Research*

WANG Liwei**¹ ZHANG Zhiqiang^{1,2} AN Peijun¹ LIU Wenhao¹

(1. Lanzhou Library, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. Chengdu Library, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Earth Critical Zone was formally proposed by the American Research Council (NRC) in 2001. Then United States, South Africa, China and other countries and relevant international organizations, such as the European Union, organized and deployed research projects, as well as developed the related research plan, established observation web site for a long time to strengthen and promote Earth Critical Zone research. In this paper, based on SCIE database, the relevant papers, research reviews, conference papers and other relevant documents from 2001 to 2015 were retrieved. Based on the Earth Critical Zone studies, the results show that: 1) the overall research papers of Earth Critical Zone show the fluctuation growth trend; 2) America and its research institutions have absolute advantage in Earth Critical Zone research, but Chinese institutions still need to further improve the research strength; 3) From the hot spot change, research topics including critical zone, hydrology, soil, etc. has become the most concerned for the major countries and institutions; 4) Interdisciplinary research is key important organization mode to Earth Critical Zone research. Finally, the four future key research directions of Earth Critical Zone in China are put forward.

Key words: bibliometrics; Earth Critical Zone; earth science; progress and trends; analysis

1 引言

地球关键带(Earth Critical Zone)的学术概念由美国国家研究理事会(NRC)于2001年正式提出^[1]。自此,对于地球关键带的概念探讨相继展开,且从不同角度对地球关键带的概念进行了阐述。例如,2005年美国国家科学基金会(NSF)发布报告^[2]指出,地球关键带包括地球的最外部表面,从植被冠层到地下水的这个区域;Lin等^[3]认为地球关键带界面层包括陆地生态系统中土壤圈及其

与大气圈、生物圈、水圈和岩石圈进行物质迁移和能量交换的交汇区域。更深入的地球关键带的概念研究包括,Brantley^[4]提出地球关键带是地质、地球化学、生物、水文、地貌和大气过程组成的复杂的相互依赖的网络的“焦点”区域;2009年NSF在《解决气候难题:研究全球的气候变化影响》报告^[5]中指出,地球关键带是指森林冠层顶部到未风化岩石基部之间的区域。而对于地球关键带的发展特征,美国特拉华大学的地球关键带研究中心^[6]认为地球关键带是以界面为特征的;Lin^[7]提出地球关键带具有逐渐演化发展的、高度的垂直异质性等特征。

基于以上地球关键带概念的讨论,本文进一步明确了相关的内涵。地球关键带是陆地生态系统

2016-06-27 收稿, 2016-11-11 接受, 2017-03-20 网络发表

* 中国科学院青年创新促进会项目(Y4AC011001)资助

** 通讯作者, E-mail: wanglw@llas.ac.cn; Tel: 18119429118

中土壤圈及其与大气圈、生物圈、水圈和岩石圈物质迁移和能量交换的交汇区域,也是维系地球生态系统功能和人类生存的关键区域,被认为是21世纪基础科学研究的重点区域,将在地球系统科学研究中扮演十分重要的角色。关键带控制着土壤的发育、水的质量和流动、化学循环,进而调节能源和矿物资源的形成与发展。这一切对地表上的生命而言都非常重要,所以,人类要实现可持续发展,必须在各种时间和空间尺度上理解和认识发生在关键带的一系列过程。

地球关键带研究是当前地球表层系统研究的一个重要前沿领域,是地球系统科学研究的重要切入点和抓手。近年来,美国^[8-15]、南非、中国以及欧盟^[16,17]等国家和地区相继组织和部署开展了地球关键带研究项目,制定了相关的研究计划,同时,建设长期野外观测网络站点,加强地球关键带研究,以期获得各圈层物质迁移与能量转换的科学数据^[18]。基于这些项目、计划和长期野外观测网络站点,国际上过去十多年已经发表了大量关于关键带研究的研究论文。

文献计量学被定义为用数学和统计学的方法,定量地分析一切知识载体的交叉科学^[19]。随着计算机和网络技术的快速发展,文献计量学逐渐向可视化、网络化和指标定量化等方向发展^[20,21]。计量分析上述论文可以反映出国际上关键带研究的进展和发展态势。作者在《国际科学技术前沿报告2016》中,利用文献计量方法对地球关键带研究进行了整体分析^[22]。而本文利用文献计量学方法,以美国科学信息研究所的科学引文索引扩展版(Science Citation Index Expanded, SCIE)中2001~2015年间与地球关键带研究相关的论文、研究综述和学术会议论文等为基础,进行了更为详细的统计分析和内容挖掘,探寻该领域的发展现状和态势,以期为我国地球关键带未来的研究方向提供科学参考。

2 地球关键带研究论文的变化趋势

本文采用SCIE关键词结合领域分类的方法检索了SCIE数据库中地球关键带研究方面的论文,并剔除了与地球关键带发展无关的领域。由于地球关键带是交叉学科未来发展方向之一,所以设定检索式为TS=(“Critical zone” or hydropedology or “near surface environment” or ((soil or agrolog* or

hydropedology or regolith or mantlerock or “Physical processes” or “land surface” or pedosphere or nutria*) and (Rock or bedrock or geosphere or lithosphere or geological processes) and (water or hydro* or groundwater or runoff or “chemical processes” or “unsaturated vadose zone”) and (air or atmosph* or weathering) and (organism* or vegetation or biolog* or biom* or “biological processes”)) and (coupl* or interact* or “mater* (exchange or flux)” or “energy (trans* or flux)” or “interfacial processes” or cycl* or storage)) ,获得2001~2015年间与地球关键带相关的论文(文献类型包括研究论文(Article)、研究综述(Review)和学术会议论文(Proceeding paper),数据采集时间为2016年6月29日)。然后,利用汤森路透集团开发的专业数据分析软件TDA(Thomson Data Analyzer)对相关数据进行清洗和分析,同时,还使用社会网络分析工具UCINET(UCINET 6 for Windows)对一些矩阵式数据进行了可视化。

地球关键带研究从概念的提出到目前的发展为15年时间(包括概念的演化历程),在这段时间内各国都在部署研究站点与计划,科研成果存在一定的滞后性,论文数量较少。但2010年以来地球关键带研究论文有所增多,这表明各国部署的地球关键带研究项目和计划的研究成果逐渐显现。从整体的发文量来看,2001~2015年地球关键带研究论文总体上呈波动性增长的趋势,个别年份较上年有一定下降。从图1可以看出,2003~2008年论文数量呈稳步增长,2012~2014年呈现快速增长,其中2014年发文量最多,为135篇,且近3年地球关键带研究论文数量增长更快,年均发表论文量超过100篇。

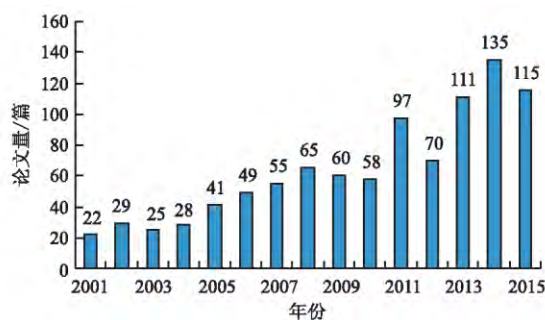


图1 2001~2015年地球关键带研究论文的总增长趋势

3 地球关键带研究力量的分布与比较

3.1 研究力量分布

1) 主要国家的发文量对比分析

按第一著者所属国家(如无特别说明,均按照第一作者统计,下同)的分析表明,全球开展关键带研究较多的国家主要有美国、中国、南非、英国、法国、德国、澳大利亚、加拿大、意大利、印度等。从表1可以看出,美国近15年在该领域占有相对优势,共计发表了352篇论文,占到了该领域全部论文的36%,而排在第二、三位的中国、南非与美国相差较大,且从列在第二位的中国之后的所有国家(包括中国)的各自论文量占全部论文的比例均在7%以下,由此可见,美国在该领域占有绝对优势。

从论文数量的变化情况来看,中国的论文数量在近15年呈逐年上升趋势,2011年以来,连续5年发文量与排在第三位之后的国家相比较都有大幅提高,反映出中国已逐步成为全球开展地球关键带研究的最主要国家之一。

表1 2001~2015年主要国家地球关键带研究论文总发文量的变化

年份	美国	中国	南非	英国	法国	德国	澳大利亚	加拿大	意大利	印度
2001	2	1	4	1	0	1	1	1	0	0
2002	5	2	7	3	0	1	1	2	1	1
2003	6	1	3	2	2	0	1	0	1	2
2004	16	0	4	3	1	1	1	0	0	0
2005	14	2	10	1	2	0	2	2	2	1
2006	16	1	5	4	1	0	4	4	2	0
2007	22	2	5	1	2	2	3	4	3	1
2008	20	1	1	8	4	2	5	3	1	1
2009	21	6	6	3	4	1	1	3	0	0
2010	16	3	4	5	5	2	2	2	3	0
2011	41	10	5	5	4	5	2	0	3	1
2012	22	10	4	3	4	6	1	1	2	3
2013	35	8	4	4	7	13	7	2	5	3
2014	59	10	1	7	10	8	3	3	1	1
2015	57	10	2	6	5	7	2	2	3	2
合计	352	67	65	56	51	49	36	29	27	16
占全部论文比/%	36.0	6.9	6.7	5.7	5.2	5.0	3.7	3.0	2.8	1.6

2) 主要机构的发文量对比分析

从机构层面来看,发文量排前10位的第一著者所属研究机构(表2)中有1个属于中国,1个属于澳大利亚,1个属于南非,其余7个全部属于美国,并且位列前三的研究机构中有2个为美国的机构,这显示了美国科研机构在该领域的影响力。具体来看,在这10个机构中,有4个机构发文量超过20篇,而中国科学院的发文量仅为18篇,占全部论文的比例接近2%,位列第五。整体而言,这表明美国的研究机构在地球关键带研究中发挥了至关重要的作用。

表2 2001~2015年开展地球关键带研究的主要机构发文量比较

排序	机构	所属国家	论文量(篇)	占全部论文比(%)
1	宾西法尼亚州立大学	美国	56	5.73
2	亚利桑那大学	美国	23	2.35
3	威特沃特斯兰德大学	南非	22	2.25
4	科罗拉多大学	美国	20	2.05
5	中国科学院	中国	18	1.84
6	杜克大学	美国	15	1.54
7	美国地质调查局	美国	13	1.33
8	加州大学伯克利分校	美国	11	1.13
9	西澳大利亚大学	澳大利亚	8	0.82
10	斯坦福大学	美国	7	0.72

3.2 研究力量比较

一直以来,论文数量及被引频次是分析研究成果影响力的2个重要维度,能够在很大程度上反映研究者的实力差别和影响大小。论文数量侧重于从量的角度反映一个国家对某领域的关注程度,论文被引频次则侧重于从质的角度反映研究水平的高低和由此产生的影响力。为了比较上述主要国家和机构的研究力量的强弱,本文设计了一种相对位置的投点象限图,以研究主体(国家/机构)的发文量为横轴,以其所发论文的篇均被引频次为纵轴,以发文量和篇均被引频次的平均值作为坐标原点,建立研究主体的研究实力评估坐标系。位于第I象限的国家/机构,其论文数量和论文篇均被引频次均高于平均水平,这在一定程度上可说明其研究具有很高的质和量,而第III象限的情况则与此相反;位于第II象限的国家/机构,虽然其论文数量低于平均水平,但被引情况却高于平均水平,说明其研究的数量还可以有进一步的提升,而第IV象限的情况则与此相反^[23,24]。

从国家层面来看(图2),投射在第I象限的仅有美国,说明其普遍重视研究的影响力;发文量排在中国之后的南非、英国、澳大利亚和加拿大被投射在第II象限,这表明这些国家发表的论文大都具有较高的影响力;与此同时,中国、法国、德国、印度和意大利等则被投射在第III象限,说明这些国家在地球关键带研究方面开展了一些相关工作,但在研究数量和质量方面与排在第I象限的美国仍存在较大的差距;前10位国家中没有被投射在第IV象限的国家。

从机构层面来看(图3),美国、澳大利亚的主要机构均具有较高的研究水平,因此被投射在第I和第II象限。值得一提的是,中国科学院位列第III象限,说明中国科学院开展了相关的研究,但整体研究水平还有很大提升空间。相比于分别位列第I

象限的宾西法尼亚州立大学和科罗拉多大学而言,中国、南非各主要机构的研究水平差距较大,影响力还有待提高。

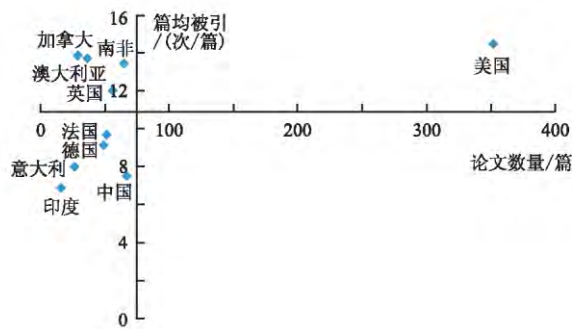


图2 主要国家地球关键带研究力量及影响力对比

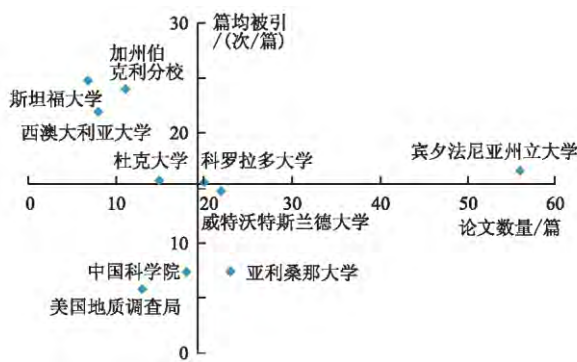


图3 主要机构地球关键带研究力量及影响力对比

4 地球关键带研究热点变化

4.1 主题词研究

从主要国家关注的研究主题来看(表3,以由高到低的词频顺序列出了各国最关注的前10个主题词),尽管关键带、水文学、土壤等研究主题是各主要国家所共同且最为关注的,但各国的关注程度和研究水平等却不尽相同,这在一定程度上反映了各国研究的重点领域与方向。除共同关注的主题外,美国还比较关注风化作用,中国还比较关注地球物理学,南非还比较关注空间尺度和矿化作用等。

从主要机构关注的研究主题来看(表4,以由高到低的词频顺序列出了各机构最关注的前10个主题词),关键带、水文学、土壤等仍然是各个主要机构最为关注的,同样关注的程度各有不同。除此之外,宾西法尼亚州立大学还比较关注风化,亚利桑那大学还比较关注碳循环,而中国科学院还比较关注地球物理学和生物地球化学等。总之,由于各国和各机构的研究实力有所差异,导致各国和各机构关注的研究主题词分布程度不同。

表3 主要国家的地球关键带研究主题

国家	最受关注的主题词
美国	关键带、土壤、风化作用、水文学、水文土壤学、径流、侵蚀、关键带观测、碳循环、景观、生态水文
中国	水文土壤学、土壤、水文学、碳循环、关键带、侵蚀、地球物理学、地球化学、物质循环、建模
南非	关键带观测、碳循环、地球化学、观测、关键带、水文学、径流、空间尺度、土壤水文学、矿化作用
英国	关键带、土壤、风化、同位素、水文土壤学、矿化、风化层、时间尺度、3-D 建模、关地表环境
法国	风化作用、关键带、碳循环、植被、侵蚀、径流、同位素、生物、耦合、水文化学
德国	关键带、关键带观测站、土壤、风化、气候变化、生物、侵蚀、地貌、水化学、水文土壤学
澳大利亚	地球化学、风化层、生物地球化学、物质循环、关键带、风化、观测网络、气候变化、生物循环、地貌
加拿大	地球化学、关键带、观测、生物、物质循环、水文学、土壤水文学、土壤、矿化作用、侵蚀
意大利	关键带、水文土壤学、土壤、地球化学、水资源、风化层、同位素、风化作用、生物、碳循环
印度	关键带、微粒物质、碳循环、同位素、碳通量、气候变化、风化作用、侵蚀、地球化学、水文学

表4 主要机构的地球关键带研究主题

宾西法尼亚州立大学	关键带、风化、水文学、水文土壤学、土壤、侵蚀、同位素、地貌学、生物地球化学、生态系统
亚利桑那大学	关键带、碳循环、地质、水文、成土作用、生态学、土壤、建模、能量、物质循环
威特沃特斯兰德大学	关键带、观测、物质循环、流域、地球化学、生物、地球化学、地球物理学、气候变化、矿化作用
科罗拉多大学	关键带、风化作用、侵蚀、风化层、生态学、水文学、关键带观测站、地球化学、气候变化土壤
中国科学院	水文土壤学、土壤、地球物理、水文学、生态系统、关键带观测站、地球化学、生物地球化学、关键带、碳循环
杜克大学	关键带、土壤酸度、生物学、土壤酸度、生态系统、地貌学、人类世、侵蚀、生物地球化学、物质循环
美国地质调查局	关键带、地球化学、生物学、土壤、植被、生态系统、地貌学、能量、水文学、生物地球化学
加州大学伯克利分校	土壤、风化、断层、生态系统、侵蚀、建模、关键带、植被、土壤水文学、径流
西澳大利亚大学	地球化学、地貌学、物质循环、矿化作用、生物地球化学、生物群、关键带观测站、建模、气候变化
斯坦福大学	关键带、物质循环、反馈、水文学、监测、流域水文、气候变化、时间尺度、土壤、沉积物

4.2 热点研究

基于对论文关键词的词频统计(图4)和对高频关键词(词频≥10)的关联可视化分析(图5,图中点的大小代表论文数量的多少,点与点之间的连线代表关联关系的强弱,连线越粗说明关联越强,反之越弱,实线比虚线代表的关联强度大。没有连线,不代表不存在关联,仅说明在该环境下关联非常弱)不难看出该领域的一些重点研究方向和研究热点:

1)除了普遍统称且无具体特指的“关键带”外,研究对象中最受关注的是土壤、风化作用和水文土壤学。与此同时,尽管关键带研究中最受关注的是关键带,但与其相关的地球化学和水文学方面的研

究受到了一定程度的关注。

2) 在地球关键带的研究中,对碳循环、径流和侵蚀等交叉学科的研究关注最多,研究手段较多采用建模、同位素和对地球关键带的观测等。同时,气候变化和生态系统领域的研究也是一个普遍关注的热点问题。

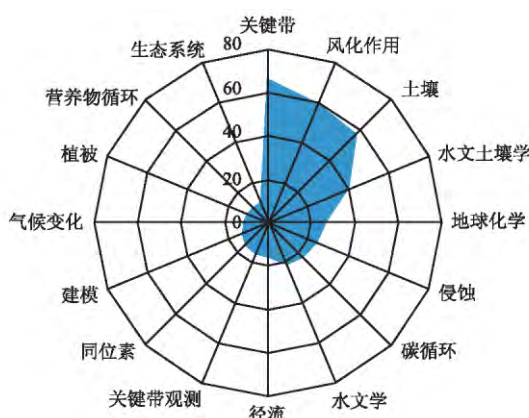


图4 地球关键带研究论文的关键词词频分布

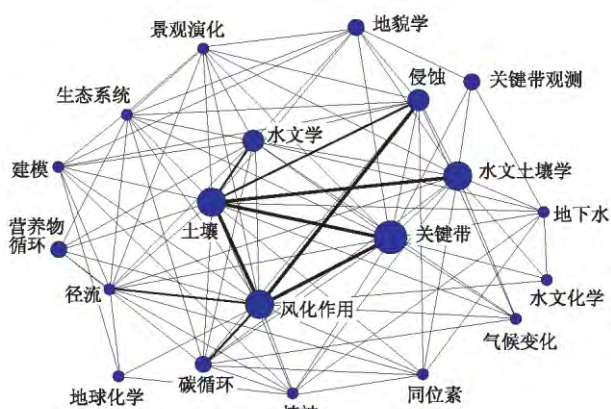


图5 地球关键带高频关键词(词频≥10)的关联可视化

5 跨学科研究情况

地球关键带是化学、生物、物理和地理过程进行耦合以维系地表生命的一种系统,对于地球关键带的深入研究还需要多个学科领域的研究者的加入。本文基于重点学科演化以及地球关键带研究论文发表的主要出版物对地球关键带跨科学研究情况进行分析。

5.1 重点学科的演化

从目前的现状来看,地球关键带科学研究所涉及的学科非常丰富。根据 ISI 数据库的学科分类,本节按论文量多少依次列出了地球关键带研究中所涉及的前 15 个学科领域,其中地球化学、地质学、环境科学、生态学、遥感学、水资源、矿物学、自然地

理学和生物化学是地球关键带研究领域 9 个持续发展的学科,据此认为它们是地球关键带研究领域的重点学科。

从上述重点学科的论文量占各年论文总数的比例来看(图6):2001~2015年间,这一比例的变化基本处于一种剧烈波动的状态,有上升也有下降,并且各学科比重变化的时间点也不一致。由此说明,地球关键带研究领域的科研方向可能处于一个不断调整的过程。具体来看,2001~2015年间,各重点学科的发展也各有不同:1)环境科学、水资源和生态学的比重快速上升,分别均在2011年(不考虑2015年数据)达到其最高水平,之后又出现了相对的下降趋势。2)地球化学和矿物学在2005年接近峰值,之后开始出现下降,而遥感学在2005年达到最低值,后又有波动上升趋势,或许表明其重新获得了重视。3)自然地理学和生物化学在低水平徘徊,但一直有相关研究在持续开展。

总体而言,在当前及未来一段时间,环境科学、水资源和生态学仍将可能是地球关键带研究领域的重心所在,其他几个学科的地位虽低于这3个学科,但仍是不能放弃的重要基础和无法忽视的基本支撑所在。总体而言,这些学科将作为地球关键带研究领域的工作基础,在整体上不断推动地球关键带研究向前发展。

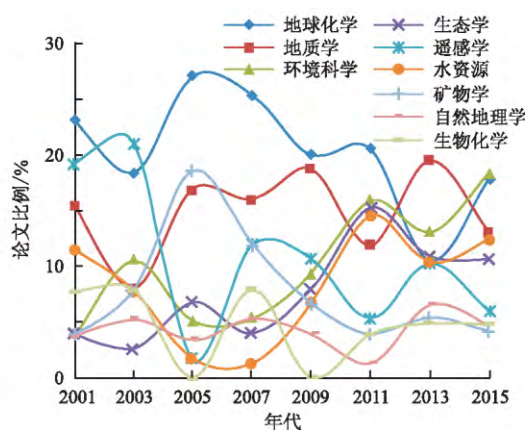


图6 2001~2015年地球关键带研究领域9个重点学科的论文比例变化

5.2 重要期刊

对 SCIE 中 2009~2015 年收录的地球关键带领域的论文进行统计,得到了发表该领域论文排名前 15 位的主要出版物(表5)。《Geochimica et Cosmochimica Acta》期刊主要发表地球化学、环境科学等学科领域的论文,《Geoderma》侧重土壤学和矿物学

等领域的研究。《Vadose Zone Journal》关注环境科学和生态学等学科领域的研究。通过对这些期刊的分析发现,未来地球关键带研究需要创办一个宽领域跨学科的科学期刊作为地球关键带科学研究成果发布的平台。

表5 2001~2015年SCIE收录的关于地球关键带研究论文的期刊排名

排名	来源出版物	论文数量/篇
1	Geochimica et Cosmochimica Acta	49
2	Geoderma	30
3	Vadose Zone Journal	26
4	Applied Geochemistry	25
5	Chemical Geology	24
6	Mineralium Deposita	20
7	Earth and Planetary Science Letters	15
8	Hydrology and Earth System Sciences	15
9	South African Journal of Geology	14
10	Earth Surface Processes and Landforms	13
11	Water Resources Research	13
12	Journal of Hydrology	11
13	Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists	10
14	Hydrological Processes	10
15	Mineralogical Magazine	10

6 结论与启示

地球关键带是国际上于2001年提出的综合性地球表层研究领域。该研究领域除受到美国、欧盟、德国等的资助重视外,在中国也越来越得到科学界的重视。2010年,“水文土壤学与地球关键带前沿研究及应用国际学术研讨会”推动了地球关键带科学在国内的发展。2014年,“第114期双清论坛”和“第36期科学与技术前沿论坛”探讨地表圈层关键带相关领域的重大科学前沿和国家需求,以及相关基础研究可能的重大突破点与未来的重大基础性科学问题。2015年,中英地球关键带学术研讨会顺利召开,加强了国际合作。本文基于SCIE数据库综合文献计量分析和相关文献调研的结果,对地球关键带国际研究论文进行了全面分析,把握了当前地球关键带研究领域的国际科技发展态势。

1) 论文整体变化趋势: 2001~2015年,地球关键带研究论文总体呈增长趋势,但年际存在较大的波动。且近3年地球关键带研究论文数量增长更快,年均发表论文量超过100篇。

2) 研究力量分布与比较分析: 对2001~2015年所有数据按国家、研究机构的发文情况进行分析得出,美国及美国研究机构在地球关键带领域研究的论文数量占绝对优势,这在一定程度上说明美国在

地球关键带研究方面最为活跃,且具有相当强的研究能力和影响力; 相比而言,中国科学院论文数量仅位列全球第5位,且位于第三象限,反映出中国研究机构需要注重地球关键带研究影响力的提高。

3) 高频关键词统计分析: 2001~2015年,关键带、水文学、土壤等研究主题成为各主要国家和机构所共同且最为关注的,但各国和机构的关注程度和研究水平等却不尽相同,这在一定程度上反映了各国和机构的重点研究方向和研究热点。

4) 跨学科研究情况分析: 从2001~2015年地球关键带领域的重点学科演化来看,最受关注的主要是环境科学、水资源和生态学等。从地球关键带研究论文发表的重要期刊来看,未来地球关键带研究需要创办一个宽领域跨学科的科学期刊作为地球关键带科学研究成果发布的平台。

目前我国的地球关键带研究还主要以单要素近地表过程综合研究为主,地表要素间系统性的有机关联研究不够。而在近地表过程综合集成研究中强调的是多要素以及相关因子之间的综合分析; 并且,地球关键带研究还没有提升到“科学”研究的层面。因此,国内外均将基于系统化认识近地表多要素、多尺度、多学科、多领域复杂地表过程作为地球关键带综合集成研究的核心目标。为了促进我国地球关键带科学研究的发展,未来我国应着重围绕以下4个方向开展研究: ①地球关键带的结构、形成与演化机制; ②地球关键带物质迁移转化与多过程耦合作用机制; ③地球关键带的服务功能、特点演化及其对可持续发展的支撑和影响; ④地球关键带过程及系统的模型模拟研究。

参考文献

- [1] National Research Council (NRC). Basic Research Opportunities in Earth Science [M]. Washington DC: National Academy Press 2001.
- [2] NSF. Frontiers in Exploration of the Critical Zone [EB/OL]. 2005 [2015-12-03]. <http://vivo.cornell.edu/display/AI-68321648640>.
- [3] LIN H S, BOUMA J, WILDING L, et al. Advances in hydrogeology [J]. Advances in Agronomy 2005 85(2005): 1-89.
- [4] BRANTLEY S, WHITE T S, WHITE A F, et al. Frontiers in Exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation [EB/OL]. 2005 [2015-12-19]. http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%283aab04f2ff3cd4f8da53ad71e29c56bb%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2Fagris.fao.org%2Fopenagris%2Fsearch.do%3FrecordID%3DXF2015042628&ie=utf-8&sc_us=5543018081619248621.

- [5] NSF. Solving the Puzzle: Researching the Impacts of Climate Change around the World [EB/OL]. 2009 [2013-02-28]. <https://www.nsf.gov/news/nsf09202/index.jsp>.
- [6] University of Delaware. New Critical Zone Observatory seeks to answer climate change questions [EB/OL]. 2009 [2010-04-29]. <http://www.udel.edu/udaily/2010/sep/observatory092809.html>.
- [7] LIN H. Earth's critical Zone and hydrogeology: concepts characteristics and advances [J]. Hydrology and Earth System Sciences 2010. 14 (1): 25-45.
- [8] NSF. Critical Zone Observatory Program [EB/OL]. 2011 [2013-06-30]. https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=500044.
- [9] CHOROVER J, ANDERSON S, AUFDENKAMPE A K, et al. Common Critical Zone Observatory (CZO) Infrastructure and Measurements [EB/OL]. 2015 [2016-01-22]. https://criticalzone.org/images/national/associated-files/1National/CZO-specific_Infrastructure_Draft_V7_forWeb.pdf.
- [10] NSF. Common questions of the US NSF – supported Critical Zone Observatories [EB/OL]. 2015 [2016-03-26]. <http://www.czen.org/sites/default/files/Dietrich-Lohse-common-questions.pdf>.
- [11] NSF. Design of Global Environmental Gradient Experiments using International Networks of Critical Zone Observatories [EB/OL]. 2012 [2015-03-26]. <http://www.nsf.gov/geo/ear/programs/czo/czo-intl-workshop-report-2011.pdf>.
- [12] NSF. Human and Natural Forcings of Critical Zone Dynamics and Evolution at the Calhoun Critical Zone Observatory [EB/OL]. 2013 [2014-01-24]. http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1331846&HistoricalAwards=false.
- [13] NSF. NSF awards MYM1. 35 million for new institute focused on Earth's critical zone: Where rock meets life [EB/OL]. 2014 [2015-01-24]. http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=133383&org=NSF&from=news.
- [14] NSF. NSF awards grants for four new critical zone observatories to study Earth surface processes [EB/OL]. 2014 [2015-01-23]. http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=130115&WT.mc_id=USNSF_51&WT.mc_ev=click.
- [15] Critical Zone Exploration Network. Supplementary workshop documents [EB/OL]. 2015 [2016-02-15]. <http://www.czen.org/content/supplementary-workshop-documents>.
- [16] European Commission. Thematic Strategy for Soil Protection. COM (2006) 231 [R]. Brussels: Commission of the European Communities 2006.
- [17] ZASLAVSKY I. Cyberinfrastructure for Environmental Observation Networks (CEON) Workshop Report [R]. Arlington: Cyberinfrastructure for Environmental Observation Networks (CEON) Workshop 2008.
- [18] 傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用 [J]. 地理科学进展 2007 26(1): 1-16.
- [19] PRITCHARD A. Statistical Bibliography or Bibliometrics [J]. Journal of Documentation 1969 25 (4): 348-349.
- [20] BÖRNER K, CHEN C, BOYACK K W. Visualizing knowledge domains [J]. Annual Review of Information Science and Technology, 2003 37 (1): 179-255.
- [21] WANG X M, MA M G, LI X, et al. Applications and researches of geographic information system technologies in bibliometrics [J]. Earth Science Informatics 2014 7 (3): 147-152.
- [22] 张志强主编. 国际科学技术前沿报告 2016 [M]. 北京: 科学出版社. 2016: 178-230.
- [23] 王立伟, 郑军卫, 赵纪东, 等. 基于文献计量的铝矿科技发展态势分析 [J]. 资源科学 2014 36(3): 653-659.
- [24] 赵纪东, 郑军卫, 刘学, 等. 基于文献计量的铁矿研究发展态势分析 [J]. 科学观察 2015 10(2): 17-24.