

引用格式:吴超玉,贾小旭,王洋,等.基于文献计量的近20年南极研究进展[J].资源科学,2022,44(1):197-209.[Wu C Y, Jia X X, Wang Y, et al. A bibliometric analysis of the progress of Antarctic scientific research over the past 20 years[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 197-209.] DOI: 10.18402/resci.2022.01.15

基于文献计量的近20年南极研究进展

吴超玉^{1,2}, 贾小旭¹, 王洋³, 牛晓倩¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071000; 3. 河北农业大学国土资源学院, 保定 071000)

摘要: 南极地区独特的地理位置和自然环境条件使其成为世界各国开展各类科研活动的热点区域。本文采用文献计量学可视化方法,以Web of Science数据库核心合集为数据源,分析了2000—2020年南极科学研究的中外发展态势和进程,明晰了近20年南极科学研究的热点及前沿研究领域,并对比分析了中国与美国等西方发达国家在南极开展科学研究的现状,进而为推动中国南极科学研究提供支撑。结果表明:①国际南极科学研究在地球科学(综合)、生态学和海洋学等学科领域发文量较高,而环境科学在南极研究的受关注程度呈不断提高态势;②美国在南极领域的发文量最多,远超其他国家。中国在南极科学研究中与美国、澳大利亚、英国、德国和法国等国家合作密切;③近年国际南极研究的热点问题主要包括南大洋生物资源和碳循环,南极气候变化和海冰异常过程,南极地质演化和古环境,南极微生物资源开发以及南大洋水团及其动力学等;冰盖质量平衡、乔治王岛、生物地理学和生物多样性等研究领域是近年南极科学研究的前沿领域。④中国在南极的科学研究相对侧重环境科学、微生物学和食品科技等领域,而在地球化学与地球物理、生态学和自然地理等领域落后于西方发达国家。未来中国要加强与南极科考强国之间的合作,在学科交叉、边缘部分寻求突破,力争在重要科技领域成为领跑者,在新兴前沿交叉领域成为开拓者。

关键词: 科技活动; CiteSpace; 可视化分析; 文献计量; 南极

DOI: 10.18402/resci.2022.01.15

1 引言

南极地区由于其特殊的地理位置和极端的自然环境,成为当前地球上受人类活动影响最小的地区之一^[1]。这里蕴藏着丰富的自然资源和科学信息,世界上各个国家陆续在此开展涉及多个学科的科学研究活动,且已获得很多突破性的研究进展。特别是2007—2008年的国际极地年(IPY),世界各国对南极内陆进行了联合科学考察活动,在南极深冰芯钻探和南极冰盖物质平衡等方面取得了丰硕成果^[2],与以往南极科技活动相比,IPY更加注重多学科和全球化,且从时间和空间尺度上对南极内陆的科学研究均取得了重大突破^[1]。中国在南极领域也取得了重要科研成果,如Sun等^[3]将企鹅考古法应

用到了考古领域,利用古文化遗址中沉积物的地球化学记录来研究古代文明的演化,以恢复人类文明发展的连续历史记录,为该领域开辟了新的研究方法;秦大河^[4]首次从理论上阐明雪的暖型、冷型和交替型密实化过程,建立了定量划分标准,系统研究了南极冰盖雪层内环境记录,揭示了现代环境的地域分异规律;Zhou等^[5]在南极地区首次成功观测到类星体“吸积燃料”的过程,并使用“内流气体探针”在8个明亮的类星体光谱中,观测到了氢、氦元素激发态吸收线,发现这些吸收线除了宇宙膨胀导致的红移外,还由于多普勒效应产生了额外的红移,进一步计算得知黑洞“吞吃”的过程可持续上万年。

对南极地区的科学研究水平体现了世界各国

收稿日期:2021-03-08 修订日期:2021-08-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1408205)。

作者简介:吴超玉,女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为资源环境管理与可持续发展。E-mail: chaoyuWU1997@163.com

通讯作者:贾小旭,男,河北保定人,研究员,博士生导师,研究方向为生态系统管理。E-mail: jiaxx@ignrr.ac.cn

的综合国力和科技水平。近年来,世界各国纷纷出台或更新各自的南极战略,其中南极科技发展和南极环境保护是各国南极战略的重要组成部分。美国最新的南极科技战略提出了4个科学领域和南极研究中的4个科学问题,对未来20年内南极地区的科学研究至关重要^[6];英国的南极科学发展战略规划了英国南极科学发展方向,提出了英国南极科技发展战略的愿景,将南极环境科学置于英国对地球进行有责任管理的核心地位^[7];澳大利亚于2011年制定和发布了首个10年期的南极科学战略,提出重点关注南极环境和气候以及南大洋生态系统^[8];中国自然资源部2018年印发的《自然资源科技创新发展规划纲要》中指出,要拓展极地认知,研发极地探测装置,推进南极资源调查与保护区选划等具体科研部署,并关注南极冰架、冰盖及全球海平面变化等科学问题^[9]。因此,分析当前各国在南极科学研究进展及成果,理清南极研究的热点问题和前沿领域,明确中国和其他南极科考强国在南极科学研究领域的差异,对中国准确把握南极科学研究方向,找准极地科研突破口等具有重要意义。

文献计量是以各领域或各学科的文献为研究对象,运用统计学的方法揭示并预测学科发展规律,了解相关机构的整体学科布局、科研实力及学科优势^[10]。文献计量法通过统计文献的各项数量特征,采用数理统计等手段评价和预测科学技术现状,已被广泛应用到多个学科领域^[11]。如於维樱等^[12]采用文献计量与引文分析的方法与工具,分析了北极海洋科学研究的整体态势与热点前沿;王武林等^[13]使用CiteSpace绘制了国内外北极航线研究的合作网络图谱和关键词共现图谱,阐明北极航线研究的知识结构关系与演进规律。为此,本文利用CiteSpace分析近20年(2000—2020年)世界各国在南极开展科学研究的进展态势,并识别和预判中国与其他南极科考强国在南极科技领域的发展方向及存在的差异,以期对未来中国南极科技活动的战略布局和规划提供参考。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

CiteSpace是基于Java语言开发的一款知识图谱绘制软件,也是目前最为流行的知识图谱绘制工具之一^[14],通过该软件的处理可将文献中复杂的信

息变得形象和直观^[15],可识别研究热点与研究前沿并将之可视化^[16,17]。本文利用Excel对年发文量进行统计分析,利用CiteSpace5.7 R4对从Web of Science(WOS)数据库中检索到的与南极相关的科学文献,将节点分别设置为“Category”“Country”“Institution”和“Keyword”,从学科领域、国家、研究机构和研究热点进行可视化。CiteSpace特有的关键词突现分析,可以计算关键词的突现强度和突现时间,从而据此描述研究领域的演变过程及发展趋势。所以将节点设置为“Keyword”和“Burstness”,利用关键词突现分析,将南极科学研究的演变过程和发展趋势进行可视化。最后,利用WOS中学科分类功能,将2000—2020年均分为4个阶段,分别统计中国与发文总量排在世界前5位国家的文献数据,对比分析中国与南极科考强国在学科领域的优势和劣势。

2.2 数据来源

本文用于研究分析的数据来源于WOS核心合集数据库,该数据库被广泛应用于文献计量研究^[18]。由WOS数据库检索到的发文数量,可体现科学界对于一个领域的关注程度以及该领域的发展态势^[19]。选取了数据库中的3个引文索引,即“科学引文索引”(SCI-EXPANDED)、“社会科学引文索引”(SSCI)、“艺术与人文科学引文索引”(A & HCI)^[20],文献数据既包括自然科学领域又包括社会科学领域。将主题词设置为“ANTARCTI*”,并排除不相关的主题如“candida antarctica lipase”“mustelus antarcticus”“glyptonotus antarcticus”等^[21]进行检索,检索时间为2000—2020年,检索日期为2021年5月8日,文献类型为“Article”,语种为所有语言,最终共检索到文献35105篇。

3 结果与分析

3.1 发文数量与学科领域

“年发文量”反映了南极科学研究的整体发展水平和趋势,是体现国际南极科学研究现状的重要指标之一^[22]。文献分析结果表明,近20年来国际南极科学研究领域的发文量呈逐年增加趋势(图1),从2000年的1250篇增长到2020年的2133篇,增长近1倍,表明各国在南极的科学研究及投入逐年增多,南极科学研究越来越受到重视。由图1可以看

2022年1月

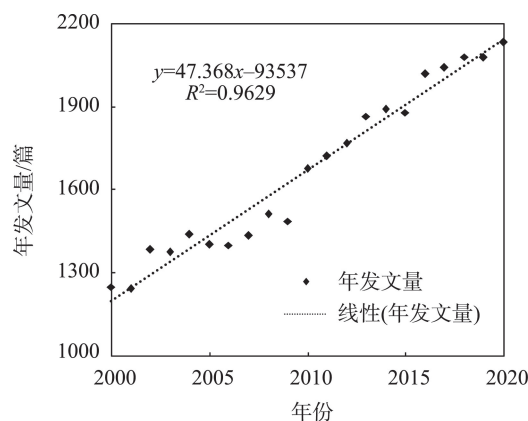


图1 2000—2020年文献发表量

Figure 1 The amount of literature published, 2000-2020

出,2007—2008年第4次国际极地年以来,年发文献量呈现出快速增长趋势,表明国际性的综合极地科考计划成功地促进了国际南极科学研究的发展。中国作为第4次国际极地年的发起国之一,在国际极地研究中做出了重要贡献^[23]。

从表1可见,近20年南极科学研究涉及多个学科领域,主要集中在地球科学(综合)(8709篇,占24.81%)、生态学(4520篇,占12.88%)、海洋学(4245篇,占12.09%)、自然地理(3670篇,占10.46%)和环境科学(3532篇,占10.06%)等。将2000—2020年均分为4个阶段,得到南极科学研究学科领域的变化趋势(图2)。结果表明,2000—2020年,地球科学(综合)研究领域一直处于首位,生态学研究领域也

稳居前列,表明这两个领域一直是南极科学研究的重点领域。分阶段看,2000—2005年全球南极科学研究领域排在前5位的分别是地球科学(综合)、海洋学、生态学、水生生物学、气象与大气科学;2006—2010年排在前5位的研究领域新增了自然地理和环境科学,且一直持续到2016—2020年。此外,地球化学与地球物理、生物多样性保护以及交叉学科领域也在国际南极科学研究中占有重要地位(图2)。

对文献进行学科领域共现分析,分别得到不同领域的中介中心性,如表1所示。结果表明,在国际南极科学研究中环境科学的中介中心性最高,表明环境科学在近年受到的关注度最大,且该领域在各

表1 发文献量与中介中心性排名前10的学科领域

Table 1 The number of papers and centrality of top 10 category areas

学科分类	发文献数量/篇	中介中心性
地球科学(综合)	8709	0.10
生态学	4520	0.05
海洋学	4245	0.09
自然地理	3670	0.06
环境科学	3532	0.11
气象与大气科学	3370	0.01
水生生物学	3031	0.07
地球化学与地球物理学	2549	0.05
生物多样性保护	2131	0.00
微生物学	1627	0.01

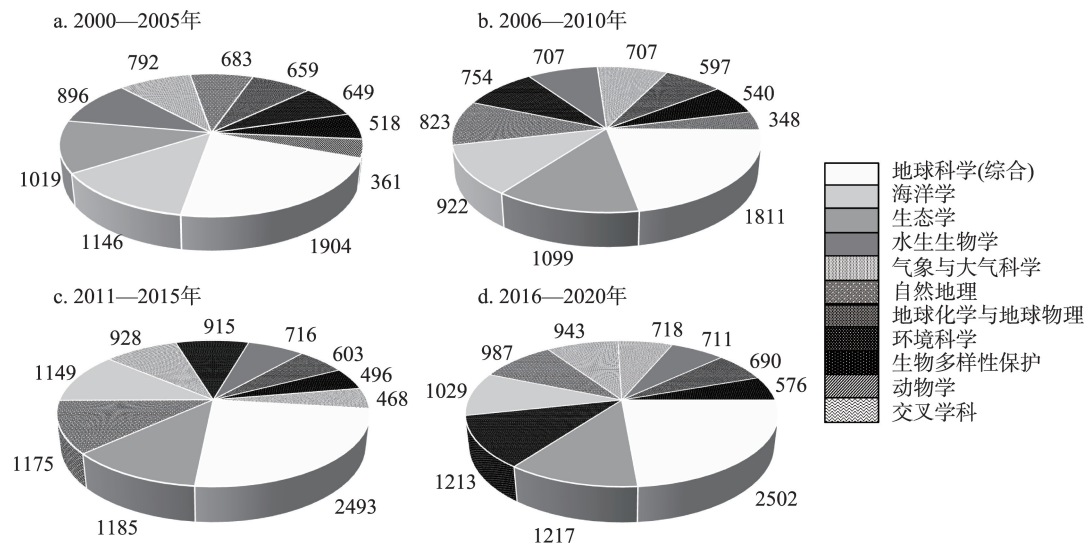


图2 2000—2020年每阶段前10名学科领域的文献发表量

Figure 2 The amount of literature published on the top ten category areas at each stage, 2000-2020

国对北极的研究中也一直占据非常重要的地位^[24]。随着南极科学考察的深入,近期的研究逐渐向微生物学及交叉学科等研究方向发展。

3.2 合作发文主要国家与机构

合作网络能够展示国际上南极领域的合作研究态势。在CiteSpace分析中,在节点类型中分别选择“Country”和“Institution”,分别设定Top N=20, Top N=50,剪裁方式选择为Pathfinder,运行后获得国家合作和研究机构合作网络。

3.2.1 国家间合作

由图3可以看出,全球南极的研究主要集中在科研水平较高的发达国家,美国、英国和德国在南极研究中占有绝对优势,其中美国的发文数量最多(11233篇,占32.00%),其后依次是英国(5497篇,占15.66%)、澳大利亚(4259篇,占12.13%)、德国(4173篇,占11.89%)、法国(3091篇,占8.81%)和意大利(2585篇,占7.36%),中国居第7位(2452篇,占6.99%)。美国在国家合作网中与其他国家连线最多(图3),表明美国在国家间南极合作中较其他国家更为活跃,因而在南极研究占有重要地位。欧洲国家之间的合作紧密程度高于亚洲,主要由于欧洲

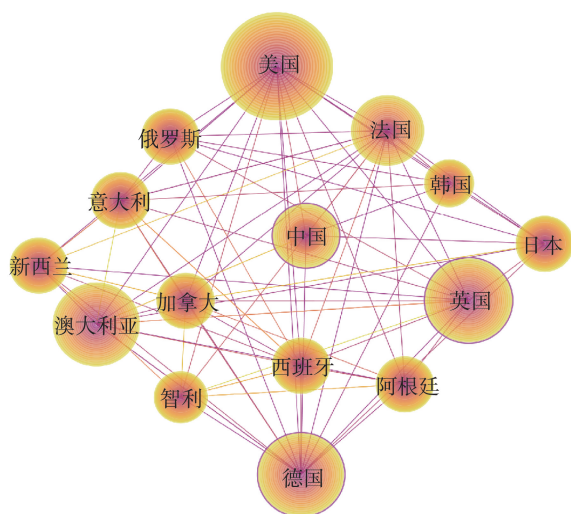


图3 南极研究国的发文合作图谱

Figure 3 Cooperation network of Antarctic related research countries

注:图中圆圈的大小代表发文数量的多少,圆圈越大,表明发文数量越多,节点外围的紫红圆圈代表该节点有着较高的中介中心性,表明该节点在南极研究的合作网络中起着重要作用,节点间的连线代表相互间有合作关系,连线颜色代表初始合作的时间,颜色越淡,表明初始合作时间越晚(黄线代表合作开始时间较晚,紫红线代表合作开始时间较早)。下同。

国家在地理位置和语言沟通等方面具有很强的合作便利性。与中国合作较多的国家有美国、澳大利亚、英国、德国、法国、意大利等,而与俄罗斯、加拿大和新西兰等国的合作相对较少,这与张玲玲等^[25]在2014年得到的结果一致。

3.2.2 机构间合作

由图4可以看出,British Antarctic Survey(英国南极调查局)在南极研究机构中的发文量最高(2531篇),但与其他机构节点的连线不明显,表明与其他研究机构合作有限;整体上来看,各个国家的南极研究机构之间的合作较少。世界南极研究机构发文量排名前50位的机构,大都集中于欧美等发达国家,这也表明发展中国家(除中国外)在南极领域的研究相对薄弱。中国的两个机构—中国科学院(860篇)和中国极地研究中心(151篇),分别排在第4和第50位,表明这两个机构在南极研究中取得了丰硕的研究成果,并且近年的研究成果较多(节点颜色较浅)。

中国进行南极科学研究的相关机构中,发文量排在前5位的有中国科学院、中国极地研究中心、中国海洋大学、国家海洋局和中国科学技术大学。虽然中国极地研究中心的发文量少于中国科学院,但是其位于中国南极科学研究机构合作网络中的中心位置(图4),且与其他机构的连线更加密集,表明其在中国南极研究中处于重要地位。从图4可以看出,中国的机构间合作还是非常密切的。

3.3 国际南极科学研究的热点问题

关键词可以对一篇文章进行高度概括和精炼,高频出现的关键词可以看作是该领域的研究热点^[26]。用CiteSpace软件对关键词进行共现分析,按照关键词共现频次排序,排在前20位(去除Antarctica)的热点关键词见表2。按照频次较高的关键词汇属性可将近年世界各国在南极领域的热点研究问题归为5类:

(1)南大洋的生物资源和碳循环:South Ocean、Diversity、Circulation、Flow、Phytoplankton

南极洲的生存环境极端恶劣,限制了大部分动植物的生存和发展,但在南大洋中仍蕴藏着丰富的生物资源,如大量的浮游植物、无脊椎动物和各种鱼类等。在南大洋生物资源中,南极磷虾资源数量占据优势,是南极高营养层级生物的重要食物来源^[27],

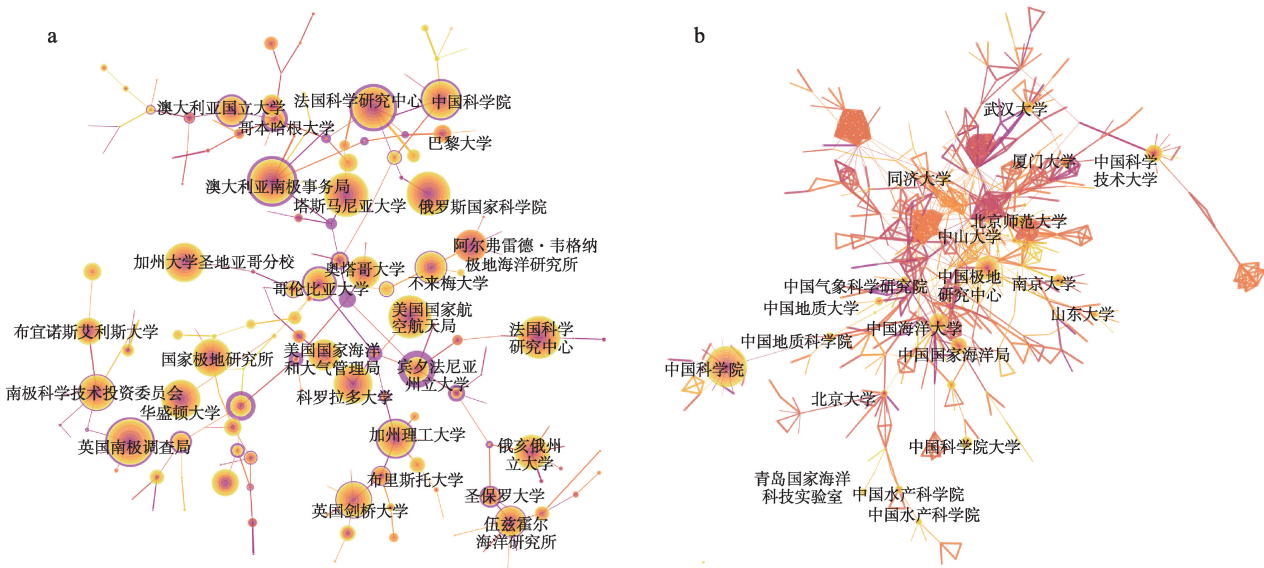


图4 国际南极研究机构合作图谱(a)和中国南极研究机构合作图谱(b)

Figure 4 Institutional cooperation network for Antarctic research (a) and Chinese institutional cooperation network for Antarctic research (b)

对维持南极海洋生态系统稳定具有重要作用。由于《南极条约》否定了主权要求国提出的海域主权要求,南极海域暂无明确主权^[28],所以对南极海洋生物资源的开发,尤其是南极磷虾资源的捕捞与产品开发已经成为世界各海洋强国发展海洋生物新兴产业竞相追逐的目标^[29]。

碳循环是全球变化研究的核心科学问题之一,南大洋约占全球大洋面积的20%,对全球气候调控起着重要作用,对全球碳循环的贡献尤为重要,是解决全球碳汇不确定性的的重要研究区域^[30,31],南大洋吸收和贮存大气CO₂的作用,以及作为人为源CO₂汇的重要性一直是国际上研究和争论的热点。

南大洋是一个典型的高营养盐、低叶绿素海区,尽管拥有丰富的浮游植物,却表现出较低的初级生产力^[32]。研究表明,Fe限制是南大洋低生产力的一个重要原因,在南大洋中进行Fe肥试验证实了施入Fe肥促进对无机碳的吸收^[33]。在施入Fe肥的区域水体中,其藻类对碳的吸收是一致的,不再受Fe的限制。对南大洋的碳循环机制和Fe肥试验还需进行深入研究。

(2)南极气候变化和海冰异常过程:Temperature、Variability、Climate change、Sea Ice、Stability

IPCC在《第五次气候变化评估报告》中指出,以全球气候变暖为主要特征的气候变化已经成为事

表2 共现频次排序前20位的热点关键词

Table 2 Top 20 keywords ranked by keyword co-occurrence frequency

排序	频次	关键词	中文释义	排序	频次	关键词	中文释义
1	2517	South Ocean	南大洋	11	1073	Water	水团
2	2098	Variability	易变性	12	995	Dynamics	动力
3	1792	Temperature	温度	13	874	Weddell Sea	威德尔海
4	1746	Evolution	演化	14	764	Flow	通量
5	1723	Model	模型	15	753	Transport	输送
6	1609	Climate change	气候变化	16	696	Sediment	沉积物
7	1326	Circulation	循环	17	690	Enzyme	酶
8	1283	Sea Ice	海冰	18	673	Community	群落
9	1211	Ross Sea	罗斯海	19	656	Phytoplankton	浮游植物
10	1201	Diversity	多样性	20	626	Ice Sheet	冰盖

实^[34]。在当前全球不断变暖的趋势下,预计到2300年南极冰盖融化将为全球海平面升高贡献3~10 m^[35]。随着对气候变化问题的不断关注,有关南极海冰长期变化趋势的研究也得到国际上的重视。研究表明,南极海冰的变化与ENSO事件有联系^[36,37],与大气环流也有密切关系^[38]。因此,研究海冰异常变化与ENSO事件和大气环流之间的相互作用对于理解气候变化和各种灾害性天气的成因具有重要意义。

(3) 南极地质演化和南极古环境: Evolution、Weddell Sea、Ross Sea、Sediment

古大陆的研究一直是国际地学研究的前沿领域^[1]。南极的地质演化与其邻近的陆块密切相关,它至少在最近的两次超级联合古陆(罗迪尼亚和冈瓦纳)演化过程中扮演着重要角色^[39]。东南极大陆的泛非期构造热事件及其在冈瓦纳超大陆拼合过程中的作用和意义,一直也是国际地学研究的热点^[40]。南极边缘海的海底保存了极高分辨率的古地质演化信息,国际深海钻探计划(ODP)组织在罗斯海、威德尔钻探计划成功的基础上,将继续在南极其他重要海域进行钻探。

南极地质演化的研究对于理解南极古环境具有重要意义,南极古环境研究作为国际南极研究科学委员会提出的关于南极地区全球变化研究的6个优先领域之一,在南极研究中有着非常重要的地位。湖泊沉积物、海洋沉积物和冰芯等都是南极古环境重要的记录载体,中外学者也对此进行了大量研究,取得了很多突破性成果^[41-43],对于重建南极古环境和古气候有重要意义。此外,收集和利用南极陨石来研究月球、火星乃至宇宙进化、地外生命也是现在南极开展的科技活动热点之一。

(4) 南极微生物资源的开发: Enzyme、Community

由于南极环境的特殊性可能决定物种在基因、生理等方面的多样性和独特性,从而产生独特化合物的代谢机制^[44]。南极极端微生物资源的开发引起科学家和各国政府的关注,欧美和日本等许多国家将其列为重点研究项目之一^[45]。在南极异常寒冷的自然环境中,以嗜冷菌、耐冷菌为主的低温微生物在生态学方面具有明显的优势。合理开发利用南极的低温微生物资源,将其应用于医药、食品、日化

及环保等诸多领域,可以丰富可供人类利用的微生物种类^[46],具有广阔的发展前景。另有研究表明,南极存在可降解油的微生物,这一发现对于全球环境来说具有重要意义,可以改善南极以及其他地区石油对环境造成的污染情况^[45]。最近几十年,大量不同种类微生物也已经被证实和报道,新的分类群也正在通过分子生物学方法不断地被发现,这也表明南极地区微生物资源的多样性及其具有的重要生态学意义要远高于人们目前的认识,需要进一步探索和挖掘^[47,48]。

(5) 南大洋水团及其动力学研究: South Ocean、Water、Dynamics

世界大洋中低于0℃的深层和底层水皆源自于南大洋。地球上最大的洋流—南极绕极流(ACC)影响着全球的大洋循环系统。探索大洋环流系统、大气环流系统和生物地球化学循环的物理学基础之间的关系,确定各种水团、海冰和洋流的形成和分布的动力学机制,研究南大洋与区域性和全球性气候变化之间的关系,是世界气候变化和预报研究计划(CLIVAR)和SCAR南极地区与全球变化研究计划(GLOCHANT)等大型国际合作研究计划提出的优先科学领域^[1]。关于普里兹湾海区的南极底层水(AABW)的来源问题也一直是南大洋研究热点问题之一^[49]。

3.4 国际南极科学的研究前沿

将节点类型选择为“Keyword”和“Burstness”,选择突现强度排在前50位的关键词,按照其开始出现时间进行排序,进而得到国际南极科学前沿领域的突现关键词(表3)。2000—2020年间每个时间段都有不同的研究前沿,且侧重点也不相同。

2000—2005年,出现的关键词包括:成因、南乔治亚岛、光合作用、大气、磷虾、北大西洋、冬季、冈瓦纳大陆、浮游植物、浮游动物、威德尔海、生物、南极大磷虾、南极、澳大利亚、碳、硅藻、限制、记录等,表明在此期间,南极科学研究的短期热点主要集中在对南乔治亚岛、北大西洋和威德尔海等海域中碳循环以及对冈瓦纳大陆的研究。成因是突现强度最大的关键词,为76.36,且持续时间最长,自2004年开始到2010年结束,表明当时对南极地区一些地质特征、海洋特征及其他一些现象的成因十分关注。

表3 2000—2020年前50位关键词突现表

Table 3 Top 50 keywords with the strongest citation bursts, 2000—2020

序号	关键词	中文释义	突现强度	持续时间	序号	关键词	中文释义	突现强度	持续时间
1	South Georgia	南乔治亚岛	43.76	2000—2004	26	New Zealand	新西兰	19.71	2010—2011
2	Photosynthesis	光合作用	42.05	2000—2002	27	Mcmurdo Sound	麦克默多海峡	38.03	2011—2013
3	North Atlantic	北大西洋	38.34	2000—2002	28	Abundance	丰富	15.79	2011—2012
4	Gondwana	冈瓦纳大陆	37.00	2000—2003	29	Bacteria	细菌	13.25	2012—2013
5	Phytoplankton	浮游植物	36.61	2000—2004	30	Beneath	在下方	31.56	2013—2014
6	zooplankton	浮游动物	36.20	2000—2003	31	Trend	趋势	68.59	2014—2020
7	Weddell Sea	威德尔海	27.20	2000—2004	32	Surface	表面	40.70	2014—2020
8	Australia	澳大利亚	24.64	2000—2001	33	Ecosystem	生态系统	26.88	2014—2015
9	Carbon	碳	22.83	2000—2002	34	Snow	雪	9.64	2014—2016
10	Diatom	硅藻	21.84	2000—2001	35	South Shetland Island	南设德兰群岛	23.93	2015—2020
11	Krill	磷虾	39.63	2001—2003	36	Antarctic Circumpolar Current	南极绕极流	17.84	2015—2017
12	Winter	冬季	37.73	2001—2005	37	Glacier	冰川	18.50	2016—2020
13	Bioma	生物	26.93	2001—2002	38	Soil	土壤	14.93	2016—2017
14	Record	记录	16.86	2001—2005	39	West Antarctic	南极西部	14.36	2016—2018
15	Euphausia Superba	南极大磷虾	26.84	2003—2004	40	Phylogeny	种系进化	61.41	2017—2020
16	Constraint	限制	20.45	2003—2005	41	Stable Isotope	稳定同位素	39.88	2017—2018
17	Origin	成因	76.36	2004—2010	42	Taxonomy	分类学	27.12	2017—2018
18	Atmosphere	大气	40.65	2004—2006	43	Pattern	模式	21.79	2017—2020
19	Antarctic	南极	25.39	2004—2005	44	Sequence	序列	36.49	2018—2020
20	Atlantic	大西洋	45.55	2007—2010	45	Mass Balance	质量平衡	36.48	2018—2020
21	Behavior	习性	23.21	2007—2008	46	Identification	鉴定	24.64	2018—2020
22	System	系统	25.26	2008—2009	47	Impact	影响	22.99	2018—2020
23	Age	时期	21.71	2008—2009	48	King George Island	乔治王岛	20.65	2018—2020
24	Victoria Land	维多利亚地	25.25	2009—2010	49	Biogeography	生物地理学	14.41	2018—2020
25	Antarctic Krill	南极磷虾	15.33	2009—2012	50	Biodiversity	生物多样性	11.61	2018—2020

除此之外,南极磷虾资源在当时也是一个研究前沿。

2006—2010年,出现的关键词包括:大西洋、系统、维多利亚地、习性、时期、新西兰、南极磷虾等。大西洋突现强度最高,为45.55,持续时间为2007—2010年,表明此阶段南极科学研究注重对大西洋生态系统方面的研究,并且对维多利亚地的研究也较多。

2011—2015年,出现的关键词包括:趋势、表面、麦克默多海峡、在下方、生态系统、南设德兰群岛、南极绕极流、丰富、细菌、雪等。趋势和表面这两个关键词不仅突现强度较高,且持续时间很长,从2014到2020年,也可能持续到未来几年。麦克默多海峡关键词持续时间为2011—2013年,为当时的一个短期热点研究区域。

2016—2020年,出现的关键词包括:种系进化、稳定同位素、序列、质量平衡、分类学、鉴定、影响、模式、乔治王岛、冰川、土壤、生物地理学、南极西部、生物多样性等。种系进化关键词的突现强度最高,为61.41,且从2017年持续到2020年,表明在此阶段对种系进化方面的研究十分注重。从2018年开始突现且一直持续到2020年的关键词为序列、质量平衡、鉴定、影响、乔治王岛、生物地理学和生物多样性。这些关键词涉及到近年南极科学研究的前沿领域,如冰盖质量平衡、乔治王岛研究区域、生物地理学和生物多样性等。

3.5 中国与南极科考强国研究领域对比分析

对2000—2020年4个阶段,分别统计中国与南极相关主题发文总量排在世界前5位国家(美国、英国、澳大利亚、德国和法国)的学科领域的文献数据

(表4)。从整体上来看,地球科学(综合)领域是各国在南极科学研究中的重中之重,海洋学、气象与大气科学、自然地理和环境科学等研究领域也在研究中占据绝对优势。

3.5.1 美国

美国在世界南极科学研究中处于领先地位,发文量居于首位,且远多于其他国家。美国在南极科学研究中起步早,与世界各国的合作也最多。2000—2020年美国一直将地球科学(综合)研究领域放在其南极科学研究的首位,在这个研究领域有丰硕的成果。例如,近期Morlighem等^[50]报告了新的地球科学研究发现,提出了一种使用质量守恒方法,新颖、高分辨率、基于物理角度的南极冰床地形描述方法,重新定义了南极洲海平面快速上升的高风险和低风险区域,对研究冰川对气候变化的响应具有重要意义。Artemieva等^[51]质疑了将南极洲西部视为大陆的传统解释,提出对南极洲大陆范围进行重新界定,这一观点对全球岩石圈地幔动力学模型和冰盖演化模型具有重要意义。海洋学、自然地理、气象与大气科学也一直是美国在南极科学研究的重点领域,但是从2011年起,美国相对减少了对地球化学与地球物理方面的研究。2016—2020年,环境

科学领域成为了美国南极科学研究的重点方向之一。

3.5.2 英国

英国在南极研究领域的发文量处在世界第2位,在南极从事科学活动起步也较早,地球科学(综合)、生态学、自然地理和海洋学等研究领域一直是英国南极科学研究的重点内容。2016—2020年,英国逐渐降低了气象与大气科学研究的比重,更加注重了在交叉学科方面的研究。交叉学科领域涉及到环境、南极冰盖质量平衡、冰川消融等方面的研究,且也已经取得了重大进展^[52-54]。英国在2014年颁布的《英国南极科学发展战略2014—2020》报告中将南极环境科学置于英国对地球进行有责任管理的核心地位的规划^[55],表明英国对南极环境科学领域的重视,从英国在环境科学领域的发文数量由2000年的8篇上升到2020年的45篇来看,也能证明这一点。

3.5.3 澳大利亚

澳大利亚地处南半球,其地理位置距离南极洲很近,比其他国家进行南极科考具有更加便利的条件。地球科学(综合)、生态学、海洋学和环境科学领域一直是澳大利亚在南极活动中开展的研究最

表4 2000—2020南极科学研究文献发文总量世界前5位国家及中国学科领域序位

Table 4 Research fields ranking of China and the top five Antarctic research countries by the total number of publications, 2000-2020

年份	美国	英国	澳大利亚	德国	法国	中国
2000—2005	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)
	海洋学	海洋学	生态学	海洋学	海洋学	交叉学科
	气象与大气科学	生态学	海洋学	生态学	气象与大气科学	环境科学
	地球化学与地球物理	水生生物学	水生生物学	水生生物学	生态学	地球化学与地球物理
	自然地理	气象与大气科学	环境科学	气象与大气科学	地球化学与地球物理	生态学
2006—2010	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)
	海洋学	生态学	生态学	海洋学	气象与大气科学	环境科学
	自然地理	自然地理	海洋学	生态学	生态学	气象与大气科学
	气象与大气科学	海洋学	环境科学	气象与大气科学	海洋学	交叉学科
	地球化学与地球物理	气象与大气科学	水生生物学	自然地理	自然地理	微生物学
2011—2015	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)
	自然地理	自然地理	生态学	自然地理	气象与大气科学	气象与大气科学
	海洋学	海洋学	海洋学	海洋学	生态学	环境科学
	气象与大气科学	生态学	环境科学	气象与大气科学	海洋学	微生物学
	生态学	气象与大气科学	水生生物学	生态学	自然地理	自然地理
2016—2020	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)	地球科学(综合)
	自然地理	自然地理	生态学	自然地理	生态学	环境科学
	气象与大气科学	生态学	环境科学	生态学	气象与大气科学	气象与大气科学
	海洋学	交叉学科	海洋学	气象与大气科学	自然地理	微生物学
	环境科学	海洋学	交叉学科	环境科学	环境科学	海洋学

2022年1月

多的4个研究领域,在近5年开始注重在交叉学科领域的研究。2011年澳大利亚南极局制订了首个10年期的南极科学战略《澳大利亚南极科学战略计划2011/12-2020/21》,该战略提出了澳大利亚在南极研究的4个主题为气候过程与变化,内陆与沿岸生态系统;环境变化与保护,南大洋生态系统;环境变化与保护,以及前沿科学^[8]。

3.5.4 德国

德国在南极科学研究中除了世界各国普遍重视的地球科学(综合)领域外,也一直比较侧重对生态学、气象与大气科学领域的研究。自2009年以来,德国针对气候变化、能源短缺、环境污染等全球问题设立了“可持续发展研究”框架计划,其中,极地与气候变化、生态系统、自然资源及其与人类活动之间的关系研究是该计划的重要组成。同年,德国在南极自然地理领域的发文量明显增多,且在2011—2020年在该领域的发文总量排在本国南极研究领域的第2位。2016—2020年期间,在环境科学研究领域的发文量首次排在本国研究领域发文量的前5位,这也表明德国在近年十分注重在南极地区环境科学方面的研究。在德国的南极科学研究中,对生物多样性领域的研究也较多,并且主要集中在研究气候和环境变化对南极生物产生的影响,以及对南极生物生活习性观察、数量估算和地理分布分析等方向^[56,57]。

3.5.5 法国

法国在南极的科学研究中开展最多的也是地球科学(综合),2000—2020年一直居于本国在南极研究领域的首位,且一直注重在气象与大气科学、生态学领域的研究。从2006年起,法国增加了自然地理领域的研究比重;在近5年,法国更加注重了在环境科学领域的科学研究,在环境科学领域的研究成果数量已经超过了海洋学领域。法国南极科技战略一直缺乏焦点,法国极地研究所(IPEV)每年实施35个左右的南极项目,涉及的学科领域比较广,主要包括南极地震与地磁研究、平流层臭氧破坏研究、冰盖与气候变化研究、中高层大气物理研究、海洋生物生态研究、鱼类和渔业研究等。法国在气象与大气科学研究领域积累的成果颇多,且很多都是跟地球科学(综合)、环境科学等研究领域共同开展的研究^[58,59]。

3.5.6 中国

中国在南极科学研究中,在地球科学(综合)领域的发文量一直排在首位。2000—2005年,中国比较注重在交叉学科、地球化学与地球物理、生态学领域的研究,但从2006年起,在南极地球化学与地球物理、生态学领域的关注度逐渐降低。2011—2020年,更加注重在环境科学、气象与大气科学领域的研究。中国近期十分重视对南极微生物学和食品科技领域的研究,从2000—2020年各国在微生物学领域的发文总量来看,中国(227篇)仅次于美国(358篇),而在食品科技领域,中国发文量居于世界第1位。目前中国已经建立了南极海洋生物资源开发利用的首个“863计划”项目,开发南极磷虾休闲食品在中国具有很好的前景^[60]。

3.5.7 中国与上述5国南极学科领域的对比分析

从各国南极科学研究结构来看,地球科学(综合)占据南极研究的主导地位,表明各个国家都很注重在跨学科的综合性的研究;环境科学领域也是南极研究的重点学科领域,2000—2020年澳大利亚和中国一直侧重于在环境科学领域的研究,而近5年,美国、德国和法国也加强了在环境科学领域的研究,这说明近几年南极的环境问题已经引起了各国的广泛关注。除此之外,美国的自然地理、气象与大气科学、海洋学排序靠前;英国和德国更加侧重在自然地理和生态学领域的研究;澳大利亚则侧重对生态学、海洋学和交叉学科方面的研究;法国侧重于生态学、气象与大气科学、自然地理领域。与其他国家不同的是,中国在南极微生物学和食品科学领域研究的成果相对较多。但是,中国在地球化学与地球物理、生态学、自然地理领域研究远落后于其他5个国家。因此,一方面,中国需要保持占据优势的研究领域,找寻独特优势的科研突破口;另一方面,需要从地球化学与地球物理领域出发,借助先进手段,弥补领域科研不足,巩固中国在南极科考领域的地位。

4 结论

本文以WOS数据库核心合集中与南极科学研究相关文献为对象,应用CiteSpace信息可视化软件对2000—2020年间国际南极科学研究文献数据进行可视化分析。得到如下主要结论:

(1)国际发文量和研究领域分析表明,从2000年以来,世界各国关于南极科学研究的文献数量快速增长。年发文量从2000年的1250篇增长到2020年的2133篇,增长近1倍;2000—2020年,地球科学(综合)和生态学研究领域一直是国际南极科学研究的热点领域,而环境科学领域的研究也逐渐成为国际极地研究领域的重要内容。

(2)美国的发文量最高且远超其他国家,国家合作网络也更密集。英、澳、德、法、意发文量位列第2~6位,中国发文量居第7位;与中国南极研究合作频次较多的国家主要有美国、澳大利亚、英国、德国、法国、意大利等;对于研究机构而言,英国南极调查局在南极研究领域的各机构中发文量最高。中国发文较多的机构主要有中国科学院和中国极地研究中心,其中中国科学院的发文数量排在世界机构发文量的第4位。

(3)近年世界各国在南极领域的热点问题包括南大洋的生物资源和碳循环、南极的气候变化和海冰异常过程、南极的地质演化和南极古环境、南极微生物资源的开发以及南大洋水团及其动力学研究等五大类。关键词突现分析表明,冰盖质量平衡、乔治王岛研究区域、生物地理学和生物多样性等关键词涉及到的研究领域是近年南极科学研究的前沿领域。

(4)世界各国都比较注重对地球科学(综合)领域的研究,除了普遍关注的综合领域外,美国、英国、澳大利亚、德国和法国都有本国相对侧重的研究领域,并且在地球化学和地球物理、生态学和自然地理等领域领先中国;中国则侧重于环境科学、微生物学和食品科技等领域的研究,且在食品科技领域的发文量居于世界首位。

综上,中国在南极科学研究领域同国际南极科考强国之间还存在较大差异,中国应该在保持食品科技研究领域优势的同时,将南极科学研究重点放在地球化学与地球物理、生态学和自然地理等领域,借鉴西方科考强国在这些领域做的热点研究,并与中国在南极研究领域其他优势学科进行跨学科的综合研究,在学科交叉、边缘部分寻求突破,弥补学科领域科研能力的不足,缩小同国际间的差距。同时,中国要加强与南极科考强国之间的合

作,借助国际上的先进技术,力争在重要科技领域成为领跑者,在新兴前沿交叉领域成为开拓者。

参考文献(References):

- [1] 陈立奇. 21世纪南极科学研究展望[J]. 世界科技研究与发展, 2002, (4): 29-34. [Chen L Q. A prospect for Antarctic science in the 21st century[J]. World Sci-Tech R & D, 2002, (4): 29-34.]
- [2] Mayewski P A, Frezzotti M, Bertler N, et al. The international trans-Antarctic scientific expedition (ITASE): An overview[J]. *Annals of Glaciology*, 2005, 41: 180-185.
- [3] Sun L G, Xie Z Q, Zhao J L. A 3, 000-year record of penguin populations[J]. *Nature*, 2000, 407(6806): 858.
- [4] 秦大河. 南极冰盖表面层内雪的密实化过程[J]. 冰川冻土, 2012, 9(3): 190-201. [Qin D H. Compaction of snow within the surface layer of the Antarctic ice sheet[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 9(3): 190-201.]
- [5] Zhou H Y, Shi X H, Yuan W M, et al. Fast inflows as the adjacent fuel of supermassive black hole accretion disks in quasars[J]. *Nature*, 2019, 573(7772): 83-86.
- [6] National Research Council. Future Science Opportunities in Antarctica and the Southern Ocean[M]. Washington: National Academies Press, 2011.
- [7] HM Government. UK Science in Antarctica 2014-2020[EB/OL]. (2014-07-16) [2021-03-01]. <https://www.gov.uk/government/publications/uk-science-in-antarctica-2014-to-2020>.
- [8] 吴依林. 论澳大利亚南极科学战略及研究主题[J]. 中国海洋大学学报: 社会科学版, 2012, (1): 1-4. [Wu Y L. Analysis of Australian Antarctic science strategy and research themes[J]. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2012, (1): 1-4.]
- [9] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源科技创新发展规划纲要[EB/OL]. (2018-10-16) [2021-03-01]. <http://law168.com.cn/doc/view?id=175163>. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Outline of Science and Technology Innovation and Development Plan for Natural Resources[EB/OL]. (2018-10-16) [2021-03-01]. <http://law168.com.cn/doc/view?id=175163>.]
- [10] Tam W W, Wong E L, Wong F C, et al. Citation classics: Top 50 cited articles in 'respiratory system'[J]. *Respirology*, 2013, 18(1): 71-81.
- [11] 蒋竹青, 彭辉. 基于文献计量学分析土壤氮素矿化研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 975-987. [Jiang Z Q, Peng H. Review on the progress of soil nitrogen mineralization based on bibliometrics analysis[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4): 975-987.]
- [12] 於维樱, 王琳, 冯志纲, 等. 1998-2017年国际北极地区海洋科学研究文献计量与发展态势[J]. 海洋科学, 2018, 42(10): 64-81. [Yu W Y, Wang L, Feng Z G, et al. Bibliometric analysis and development trends of global Arctic marine scientific research[J].

2022年1月

- Marine Sciences, 2018, 42(10): 64–81.]
- [13] 王武林, 龚姣, 王成金. 基于CiteSpace的北极航线研究进展与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(11): 2075–2091. [Wang W L, Gong J, Wang C J. Progress and prospect of research on the Arctic passage based on CiteSpace[J]. Resources Science, 2020, 42(11): 2075–2091.]
- [14] 彭飞, 富宁宁, 胡伟, 等. 国内外海洋资源研究知识图谱解析及启示[J]. 资源科学, 2020, 42(11): 2047–2061. [Peng F, Fu N N, Hu W, et al. Analysis and enlightenment of knowledge map of marine resources research at home and abroad[J]. Resources Science, 2020, 42(11): 2047–2061.]
- [15] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359–377.
- [16] 蓝曼, 林爱文, 金添, 等. 中国自然资源核算评估研究知识图谱量化分析[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 621–635. [Lan M, Lin A W, Jin T, et al. Quantitative analysis of knowledge maps of natural resources accounting and assessment research in China based on CiteSpace[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 621–635.]
- [17] Chen C M. Science mapping: A systematic review of the literature [J]. Journal of Data and Information Science, 2017, 2(2): 1–40.
- [18] 胡远妹, 周俊, 刘海龙, 等. 基于Web of Science对土壤重金属污染修复研究的计量分析[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 707–720. [Hu Y M, Zhou J, Liu H L, et al. Bibliometric analysis of studies on remediation of heavy metals contaminated soils based on Web of Science[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 707–720.]
- [19] 串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 等. 基于Web of Science数据库的土壤污染修复领域发展态势分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 12–20. [Chuan L M, Zheng H G, Zhao T K, et al. Trends in research on contaminated soil remediation based on web of science database[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 12–20.]
- [20] 华薇娜, 张洁, 刘芳, 等. 美国WoS数据库收录的中国南北极研究论文的调研与分析[J]. 极地研究, 2009, 21(2): 124–140. [Hua W N, Zhang J, Liu F, et al. A bibliometric study on Chinese Journal of Polar Research articles participated by Chinese scholars covered in WOS[J]. Chinese Journal of Chinese Journal of Polar Research, 2009, 21(2): 124–140.]
- [21] Ji Q, Pang X P, Zhao X. A bibliometric analysis of research on Antarctica during 1993–2012[J]. Scientometrics, 2014, 101(3): 1925–1939.
- [22] 张禄禄. 中国和主要极地国家极地科技体制研究及其启示[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2017. [Zhang L L. Research and Enlightenment of Polar Science and Technology System in China and Main Polar Countries[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2017.]
- [23] 国际极地年中国行动委员会. 国际极地年(IPY)中国行动计划简介[J]. 极地研究, 2007, 19(1): 76–77. [China Action Committee for the International Polar Year. Introduction to China action plan for International Polar Year (IPY)[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2007, 19(1): 76–77.]
- [24] 王雪梅. 基于文献计量的国际极地研究进展分析[J]. 科学观察, 2012, 7(2): 33–40. [Wang X M. A bibliometrical analysis of International Chinese Journal of Polar Research[J]. Science Focus, 2012, 7(2): 33–40.]
- [25] 张玲玲, 华薇娜. 基于WoS数据库论文检索的中国南极科研成果多指标统计分析[J]. 极地研究, 2014, 26(3): 378–387. [Zhang L L, Hua W N. An analysis of Chinese Antarctic scientific research achievements based on Web of Science[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(3): 378–387.]
- [26] 吴昊, 郭琳, 於维樱, 等. 基于文献计量分析的国际海洋科学研究发展态势[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1860–1873. [Wu H, Guo L, Yu W Y, et al. Development trend of international marine science research based on bibliometric analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1860–1873.]
- [27] 孙松, 孙晓霞. 对生物海洋学内涵的理解[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 684–694. [Sun S, Sun X X. The connotation of biological oceanography[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 684–694.]
- [28] 陈力. 论南极海域的法律地位[J]. 复旦学报(社会科学版), 2014, 56(5): 150–160. [Chen L. Study on the legal status of Antarctic Ocean[J]. Fudan Journal (Social Sciences Edition), 2014, 56(5): 150–160.]
- [29] 刘永新, 李梦龙, 方辉, 等. 南极磷虾的资源概况与生态系统功能[J]. 水产学杂志, 2019, 32(1): 55–60. [Liu Y X, Li M L, Fang H, et al. Resources status and ecosystem function in Antarctic Krill[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2019, 32(1): 55–60.]
- [30] Webb D J, Sugihara N. Vertical mixing in the ocean[J]. Nature, 2001, 409(6816): 37.
- [31] 高众勇, 陈立奇. 南北极海区碳循环与全球变化研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 263–269. [Gao Z Y. Global change and carbon cycle in the polar ocean[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 263–269.]
- [32] 高众勇, 陈立奇. 南大洋碳循环研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(4): 41–48. [Gao Z Y, Chen L Q. Study of carbon cycling in the southern ocean: A review[J]. World Sci-Tech R & D, 2002, 24(4): 41–48.]
- [33] Bakker D C E, Watson A J, Law C S. Southern Ocean iron enrichment promotes inorganic carbon drawdown[J]. Deep-Sea Research, 2001, (11): 2483–2507.
- [34] 董思言, 高学杰. 长期气候变化: IPCC第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56–59. [Dong S Y, Gao X J. Long-term climate change: Interpretation of IPCC fifth assessment report[J]. Climate Change Research, 2014, 10(1): 56–59.]

- [35] Golledge N R, Kowalewski D E, Naish T R, et al. The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise[J]. *Nature*, 2015, 526(7573): 421–425.
- [36] Chen J N. Characteristics of change in the Antarctic sea ice area and its relation to SST in the tropical Pacific[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 1999, 10(1): 67–73.
- [37] Chen J N, Qin Z H. The characteristics of the SST in the western Pacific and Indian ocean and its response to the Antarctic sea ice area change[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(3): 340–347.
- [38] 周秀骥, 陆龙骅. 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1996. [Zhou X J, Lu L H. Research on the Interaction and Influence of Antarctica with Global Climate Environment[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996.]
- [39] 任江波, 邓希光, 杨永. 南极前寒武纪地质演化及其与澳洲和印度的关系[J]. *南海地质研究*, 2012, 10(1): 91–100. [Ren J B, Deng X G, Yang Y. Precambrian tectonic evolution of Antarctica and its relationship with Australia and India[J]. *Geological Research of South China Sea*, 2012, 10(1): 91–100.]
- [40] 刘晓波. 中国南极地球科学探索与研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. [Liu X B. Scientific Exploration and Research of the Chinese Antarctic Geoscience[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.]
- [41] Sun L G, Xie Z Q. Relics: Penguin population programs[J]. *Science Progress*, 2001, 84(1): 31–44.
- [42] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399(6735): 429–436.
- [43] 赵俊琳. 南极长城站地区现代环境地球化学特征与自然环境演变[M]. 北京: 科学出版社, 1991. [Zhao J L. Modern Environmental Geochemical Characteristics and Natural Environmental Evolution in the Great Wall Station Area of Antarctica[M]. Beijing: Science Press, 1991.]
- [44] Bridge P D, Spooner B M. Non-lichenized Antarctic fungi: Transient visitors or members of a cryptic ecosystem[J]. *Fungal Ecology*, 2012, 5(4): 381–394.
- [45] 任修海. 南极微生物资源的生物技术开发[J]. *生物学杂志*, 1993, (3): 19–20. [Ren X H. Biotechnology development of Antarctic microbial resources[J]. *Journal of Biology*, 1993, (3): 19–20.]
- [46] 曾胤新, 陈波. 南极低温微生物研究及其应用前景[J]. *极地研究*, 1999, 11(2): 66–75. [Zeng Y X, Chen B. Progress and application prospects in the study on Antarctic cold-adapted microorganisms[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 1999, 11(2): 66–75.]
- [47] 李桂秀. 南极土壤微生物多样性初步研究与耐盐相关功能基因筛选[D]. 烟台: 烟台大学, 2020. [Li G X. Preliminary Study on Antarctic Soil Microbial Diversity and Screening of Functional Genes Related to Salt Tolerance[D]. Yantai: Yantai University, 2020.]
- [48] 常俊男. 南极微生物的分离鉴定及其次级代谢产物研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019. [Chang J N. Isolation and Identification of Antarctic Microorganisms and Study on their Secondary Metabolites[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.]
- [49] 史久新, 赵进平. 中国南大洋水团、环流和海冰研究进展(1995–2002)[J]. *海洋科学进展*, 2002, (4): 116–126. [Shi J X, Zhao J P. Advances in Chinese studies on water masses, circulation and sea ice in the southern ocean (1995–2002)[J]. *Advances in Marine Science*, 2002, (4): 116–126.]
- [50] Morlighem M, Rignot E, Binder T, et al. Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(2): 132–137.
- [51] Artemieva I M, Thybo H. Continent size revisited: Geophysical evidence for West Antarctica as a back-arc system[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103106.
- [52] Gray A, Krolkowski M, Fretwell P, et al. Remote sensing reveals Antarctic green snow algae as important terrestrial carbon sink[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1–9.
- [53] Lacerda A L F, Rodrigues L S, Van Sebille E, et al. Plastics in sea surface waters around the Antarctic Peninsula[J]. *Scientific Reports*, 2019, DOI: 10.1038/s41598-019-40311-4.
- [54] Shepherd A, Ivins E, Rignot E, et al. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017[J]. *Nature*, 2018, 558: 219–222.
- [55] 鲍文涵. 英国的南极参与: 过程、目标与战略[J]. *世界经济与政治论坛*, 2016, (2): 70–84. [Bao W H. British Antarctic participation: Process, goal and strategy[J]. *Forum of World Economics & Politics*, 2016, (2): 70–84.]
- [56] Gutt J, Bertler N, Bracegirdle T J, et al. The Southern Ocean ecosystem under multiple climate change stresses—an integrated circumpolar assessment[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1434–1453.
- [57] Krabbe K, Leese F, Mayer C, et al. Cryptic mitochondrial lineages in the widespread pycnogonid *Colossendeis megalonyx* Hoek, 1881 from Antarctic and Subantarctic waters[J]. *Polar Biology*, 2010, 33(3): 281–292.
- [58] Fürst J J, Durand G, Gillet-Chaulet F, et al. The safety band of Antarctic ice shelves[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 479–482.
- [59] Orme L C, Crosta X, Miettinen A, et al. Sea surface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean over the Late Glacial and Holocene[J]. *Climate of the Past*, 2020, 16(4): 1451–1467.
- [60] 刘晔, 赵晓黎, 孙露. 掌握关键技术开发南极磷虾休闲食品[J]. *中国食品*, 2019, (19): 128. [Liu X, Zhao X L, Sun L. Grasp the key technology to develop Antarctic krill snack food[J]. *China Food*, 2019, (19): 128.]

A bibliometric analysis of the progress of Antarctic scientific research over the past 20 years

WU Chaoyu^{1,2}, JIA Xiaoxu¹, WANG Yang³, NIU Xiaoqian¹

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 3. College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: Many countries in the world conduct scientific research in the Antarctic for its abundant natural resources and ambiguous ownership. Taking the Web of Science Core Collection database as data source, this study analyzed the development trend and process of international scientific research in the Antarctic from 2000 to 2020 using the method of bibliometric analysis and visualization. The hot spots and frontier fields in Antarctic research in recent 20 years were clarified and the associated research progress in China and some Western developed countries (such as the United States) was compared to provide basic supports for the promotion of China's scientific research in the Antarctic. The results show that: (1) The number of papers published on international Antarctic research is relatively high in the fields of geosciences (multidisciplinary), ecology, and oceanography, whereas the attention of environmental sciences in Antarctic research is increasing. (2) The United States has published the most papers in the Antarctic research field, far more than other countries in the world. China cooperates closely with the United States, Australia, the UK, Germany, and France in Antarctic scientific research. (3) In recent years, the hot issues of international Antarctic research mainly include the biological resources and carbon cycle of the Southern Ocean, the Antarctic climate change and sea ice anomaly process, the Antarctic geological evolution and paleoenvironment, the development of microbial resources in the Antarctic, and the Southern Ocean water mass and its dynamics, among others; the research fields of ice sheet mass balance, King George Island, biogeography, and biodiversity are the frontiers of Antarctic scientific research in recent years. (4) China focuses on environmental sciences, microbiology, and food technology in Antarctic scientific research, but still lags behind many Western developed countries in the field of geochemistry and geophysics, ecology, and physical geography. In the future, China should strengthen the cooperation with the Antarctic scientific research key players, seek breakthroughs in the interdisciplinary and marginal areas, and strive to become a leader in important scientific and technological fields and a pioneer in new frontier interdisciplinary research fields.

Key words: scientific activities; CiteSpace; visualized analysis; bibliometrics; the Antarctic