

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)研究的 战略部署与研究热点^{*}

王琳¹ 张灿影¹ 於维樱¹ 冯志纲¹ 张晓琨² 汪嘉宁^{*,1}

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要:厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)影响着全球气候,被认为与众多全球灾害性天气事件有关。为了更好地了解 ENSO 研究的发展趋势及其对全球海洋事务的影响,本文对 WCRP、GOOS 和 TPOS 2020 等与 ENSO 研究相关的国际研究计划和各国家地区的 ENSO 研究战略情况进行梳理,并结合 VOSviewer 文献计量学方法进行分析,探讨 ENSO 研究的国际发展趋势及研究热点,以便为我国 ENSO 相关研究与决策提供参考。

关键词:厄尔尼诺-南方涛动; ENSO; 战略; 态势

中图分类号: P711; G359 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2018.12.014

Research Strategy and Hotspots of ENSO Research^{*}

WANG Lin¹ ZHANG Canying¹ YU Weiying¹ FENG Zhigang¹
ZHANG Xiaokun² WANG Jianing^{*,1}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: El Niño-Southern Oscillation (ENSO), which affects the global climate, is believed to be associated with lots of catastrophic weather events, such as floods, hurricanes, droughts and tornados. ENSO studies have important scientific, economic and social significance. In order to better understand the developing trend of ENSO research and the impact of ENSO on global maritime affairs, a comparative analysis of the international strategies and status of ENSO studies is provided in this paper. By adopting an applied bibliometrics method, hot issues and developing trends of ENSO are explored in detail, hoping to provide useful references for ENSO-related research and decision-making processes.

Key words: El Niño-Southern Oscillation; ENSO; strategy; trend

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是热带太平洋附近的风与海洋表面温度的一种周期性不规则变化,影响着热带和亚热带的大部分气候^[1],由厄尔尼诺与南方涛动这

两种存在着密切联系的现象组成(在厄尔尼诺现象发生后,拉尼娜现象(La Niña)有时会紧随其后,它的作用几乎与厄尔尼诺相反)。其中,厄尔尼诺现象(El Niño)又称厄尔尼诺海流,是太平洋

^{*} 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDB-SSW-SYS03),青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划(2016ASKJ11-ZRW03)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: wjn@qdio.ac.cn; Tel: 0532-82898758

赤道带海洋和大气在大范围相互作用后失去平衡而产生的一种反常的自然现象。而南方涛动是伴随厄尔尼诺和拉尼娜出现的气压场和海温变化。

ENSO 影响着全球的温度和降水,地球上的许多年际气候变化都与其有关,包括全球大气,这种复杂的异常气候现象与全球范围内的洪水、飓风、干旱、气旋等多种恶劣天气事件有关,给海洋生物、鸟类和人类带来灾难^[2-4]。在 1900—2016 年期间科学家已经发现了至少 26 次 ENSO 事件,其中 1982—1983 年、1997—1998 年和 2015—2016 年都发生了极其严重的 ENSO 事件^[5]。这些事件给当地的天气和海洋生物造成了极大的影响,也影响了世界各地的气候条件。在厄尔尼诺年,海温异常不仅影响印度尼西亚、澳大利亚、印度、巴西、秘鲁、厄瓜多尔和智利等临海国家,还会因为遥相关的作用影响其他内陆地区^[6]。2015/16 年史上最强的 ENSO 现象影响了全世界超过 6000 万人。

近些年来,全球多地极端天气事件频发,地震、干旱、高温、洪水、泥石流等重大灾害显著增多。根据粮农组织的研究报告,ENSO 事件增加了部分地区暴雨和洪水泛滥的风险,另一些地区则是降雨减少,干旱风险增加,严重影响了农业和食品安全,且不同地域受到的影响各不相同:在南非和东非,天气异常炎热,埃塞俄比亚等国出现了严重的干旱,对依赖农业和牲畜的家庭的生计产生了深远影响,导致数千万人依赖粮食援助;在亚洲,菲律宾、印尼、印度、巴布亚新几内亚、东帝汶以及太平洋岛屿等地区出现干旱,粮食减产,中国南涝北旱,澳大利亚、巴西等地也出现干旱少雨的情况;而在美洲,气候变得更加潮湿,南美沿岸的秘鲁、厄瓜多尔等地暴雨成灾,美国南部和南美洲的降水量激增,暴风雨和大洪水的灾害增加^[7]。

此外,在夏季,孟加拉国、印度、菲律宾等国易受热带风暴的袭击。而到了冬季,美国东部等地则很可能遭遇严寒天气^[7,8]。

随着全球变暖,ENSO 现象出现得日益频繁,且滞留时间延长。世界各国也越来越重视 ENSO 这一科学现象及其所带来的影响。科学家们利用先进的仪器和设备对 ENSO 开展了不同层面的研究,通过采取一系列预报模型、海洋观测和卫星侦察、海洋大气耦合等科研活动,不断深化对这种气候异常现象的认识,加强对 ENSO 引起的异常天气的预测。目前,秘鲁已经成功地将厄尔尼诺预测应用于农业规划,澳大利亚、巴西、埃塞俄比亚和印度也采取了类似措施。大多数热带国家都可以从厄尔尼诺预测中受益,受益程度则取决于气候预测模型的准确性。而在热带地区之外的许多国家,如日本和美国,更准确地预测厄尔尼诺也有益于其对农业、水资源管理、粮食和原油储备等领域的战略规划。

为了更好地了解 ENSO 现象的全球趋势和研究热点,本文通过梳理国际上与 ENSO 研究相关的战略部署与规划,结合文献计量学分析,对 ENSO 的研究热点和发展趋势进行了综合分析,以便为 ENSO 研究的海洋事务提供参考。

1 厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)研究相关的战略部署

近些年来,世界气候研究计划 WCRP、全球海洋观测系列计划 GOOS 以及热带太平洋观测系统 2020 计划(TPOS 2020)等国际研究计划都对 ENSO 的相关研究进行了重点部署。欧盟国家和美国、加拿大等海洋强国分别资助和开展了与 ENSO 研究相关的多个研究计划,中国也参与其中。这些计划在人员、资源等方面都存在着一些合作

关系,尽管具体的研究区域不尽相同,但研究目标都是想揭秘 ENSO 机制,以期实现对 ENSO 的准确预测。

1.1 全球性计划

1.1.1 世界气候研究计划 WCRP

世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)由世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)与国际科学联合会(International Council of Scientific Union, ICSU)联合主持,以物理气候系统为主要研究对象,是1967—1980年执行的全球大气研究计划(GARP)的延续,1970年代开始酝酿,1980年代开始执行至今,是全球变化研究中开展得较早的一个计划,是“世界气候计划”(World Climate Program, WCP)的最主要部分。WCRP主要研究地球系统中有关气候的物理过程,涉及整个气候系统,尤其是大气、海洋、低温层(冰雪圈)和陆地以及这些组成部分之间的相互作用和反馈,重点关注时间尺度为数周到数十年的气候变化,其目标主要包括两个方面:一是气候的可预报程度,二是人类活动对气候的影响^[9]。

目前 WCRP 开展了四个主要方向的核心研究计划:气候和冰冻圈计划(CliC)、气候变率及其可预测性计划(CLIVAR)、全球能量与水交换(GEWEX)计划,以及平流层-对流层过程及其在气候中的作用(SPARC)^[10]。其中,气候变率及其可预测性计划的研究重点就包含 ENSO 研究。该计划于1995年在热带海洋和全球大气计划(TOGA)和世界海洋环流实验(WOCE)的成功基础上启动,持续至今。其目标是进一步了解海洋和气候,重点研究变化的大气和缓慢变化的陆面、海洋和冰雪过程、人类的影响以及地球化学和生物物质的变化,尤其是世界季风环流年循环强度的预

报及海洋与其相互的变率。其研究重点包括:①年代际气候变率和可预测性(DCVP);②东部边界上升流系统(EBUS);③区域海平面变化和沿海影响;④天气及气候极端事件的认知和预测;⑤ ENSO 在气候变化中的作用;⑥行星能量平衡与海洋热量储存(CONCEPT-HEAT)之间的一致性。其中,④和⑤都与 ENSO 研究密切相关,在 ENSO 的多样性(厄尔尼诺现象的类型)、极端事件的发展、可预测性、影响和在气候变暖这一当前背景下的遥相关作用等方面都取得了重要进展。

WCRP 开展的具体研究计划中涉及 ENSO 研究的计划按照时间顺序主要包括:

1) 热带海洋与全球大气试验(Tropical Ocean & Global Atmosphere, TOGA): TOGA 是一个历时10年的世界气候研究子计划(1985—1994),旨在预测长达数月或数年的气候现象。其目标是研究三大热带海洋的海洋与大气变率,美国开展的研究主要集中在太平洋,由国家海洋与大气管理局(NOAA)、美国国家科学基金与美国国家航天航空局给予资金资助。中方的合作机构是 NOAA,由南海分局负责组织实施,10年间连续进行了8个航次的中美西太平洋和全球气候大气相关作用研究合作调查。合作调查的主要内容包括:①热带西太平洋海气系统的热量、能量平衡和收支变化与厄尔尼诺、南方涛动、季风及大气环流的关系;②热带西太平洋赤道辅合带、赤道西风、赤道气流的维持、季风变化、年际变化及其与南方涛动的产生、发展的关系;③赤道附近太平洋表层水温的变化对副热带高压、季风活动和中纬度大气环流的影响;④赤道表层流系、潜流、温跃层纬向坡度流、上升流等与风应力场的关系;⑤由区域性表面风应力半年振荡所引起的近表层海流和温度的起伏;⑥已有的海气相互作用模式,包括描述海

流和热量对大气扰动的响应、海面潜热变化对南方涛动的响应以及大气对海洋热源的异常响应等。TOGA 计划把大气的相互作用与热带海洋环流紧密联系起来,能够提前一年以上预测到厄尔尼诺现象。

2) ENSO 模拟比对项目 (ENSIP): ENSIP 是一项在海气耦合模型中对比 ENSO 模拟的协同研究 (1992—1996), 由 GOALS 数值实验研究组 (NEG1)、气候变率及其可预测性计划 (CLIVAR) 和 WCRP 协同组织。自 1992 年开始, ENSIP 开展了赤道太平洋海表面温度 Hovmöller 图、Nino-3 ($90^{\circ}\text{W} \sim 150^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$) 海表面温度异常与沿赤道热含量异常的相关性等方面的研究, 主要集中在对太平洋 $5^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$ 的 SST、风应力和上层海洋热含量 (平均位于上层海洋 300 ~ 400 米) 的研究。该研究比较了二十四对耦合的海洋—大气模式在热带太平洋区域的模拟效果, 包括 TOGA 中的模式 (即高分辨率热带海洋模型、粗分辨率全球大气模型、粗分辨率全球耦合模型, 以及一些在赤道地区具有高分辨率的全球耦合模型), 同时也研究了年平均状态、季节周期和年际变化的表现。分析的主要量化指标是海表面温度 (SST)。此外, 还研究了热带太平洋年际热含量变化的演变以及赤道太平洋年际 SST 变化与印度夏季风强度波动之间的关系。结果发现, 后期模型尽管相对于早期的比对研究有了一些改进, 但几乎所有模型 (甚至那些采用通量校正的模型) 在模拟 SST 气候学方面仍然存在问题, 只有少数耦合模型根据赤道 SST 异常模拟了 ENSO, 大多数模型只显示了 ENSO 与印度夏季风强度之间的紧密联系。

3) 耦合模型中热带海洋研究 (STOIC): STOIC 是由 CLIVAR-WGSIP (WGSIP, 季节内至年代际预测工作组) 在 1996 年发起的研究计划, 到

2002 年结束。目的是识别耦合模型在热带海洋地区的常见优点和缺点。STOIC 是 ENSIP (WGSIP 另一个项目) 的补充, ENSIP 项目的研究集中在赤道太平洋, 而 STOIC 则侧重于大西洋和印度地区, 并调查了其与太平洋地区的关系, 重点从 24 个模型中收集包含热带海表面温度、表面风应力和上层海洋垂直平均温度等数据, 并与观察到的年平均值、季节循环和年际变化特征等相比较。该研究在海气耦合模型中对热带海洋行为进行了季节和年际时间尺度上的比较。

1.1.2 全球海洋观测系统 GOOS

全球海洋观测系统 (Global Ocean Observing System, GOOS) 是由政府间海洋学委员会 (IOC)、世界气象组织、国际科学联合会理事会和联合国环境规划署共同发起并组织实施的一个全球性项目, 旨在更好地了解海洋气候和生态系统, 以及人类的影响和脆弱性。GOOS 协调全球海洋的观测, 涉及三个关键主题: 气候、运营服务和海洋生态系统健康, 其中气候主题与 ENSO 研究密切相关。该主题涉及全球气候观测系统中的海洋部分, 目的是监测、描述和认识决定大洋环流的物理和生物地球化学过程及其对碳循环的影响, 以及大洋对数十年时间尺度气候变化的影响, 并提供预报气候变化所需的观测资料^[11]。

Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography, 地转海洋学实时观测阵) 全球海洋温度/盐度浮标阵列 (2000 年实施至今) 是 GOOS 中一个针对全球海洋上层 (2000 米) 海水温度和盐度观测的全球性海洋观测计划, 为全球 ENSO 研究提供了重要数据支持。Argo 全球海洋观测网的建设最初起源于 1990—1997 年的世界海洋环流实验 (WOCE, 世界气候研究计划 WCRP 的一部分)。WOCE 计划需要收集整个海洋 1000 米范围

内的洋流数据,为此,美国斯克瑞普斯海洋学研究所的 Russ Davis 和韦伯研究公司的 Doug Webb 联合开发了自主拉格朗日环流探索者 (ALACE)。ALACE 浮标使用 John Swallow 在 20 世纪 50 年代中期发明的中性浮力原理,可在特定的压力水平下跟踪水流。当上升到水面时,ALACE 也可以测量其上升所经过的水的温度和盐度,因此,在 WOCE 计划接近结束时,大多数 ALACE 都载有温度/盐度传感器。随后,1998 年,美国的海洋科学家进一步探讨了利用剖面浮标监测海洋的潜力,并筹划推出了大型海洋观测计划 Argo。Argo 计划一经推出就得到了澳大利亚、加拿大、法国、德国、中国、日本和韩国等国家的响应和支持,并逐步成为全球气候观测系统 GCOS、GOOS、CLIVAR 和全球海洋资料同化试验 (GODAE) 等大型国际观测和研究计划的重要组成部分。Argo 是其他正在发展中的海洋观测系统可以遵循的标准,为如何进行国际合作、开发数据管理系统以及改变科学家收集数据的方式等提供了思路和方法。Argo 计划目前在全球大洋中每隔 300 公里布放一个剖面浮标,总计有 3900 多个,组成了一个庞大的 Argo 全球海洋观测网,加速推进了对全球大洋的观测。Argo 的设计需要随着技术和需求的变化而调整,并逐步实现全球覆盖,包括极地和边缘海,以便通过快速、准确地收集全球海洋上层的海水温、盐度剖面资料,提升对气候灾害的预测能力并提高气候预报的精度。目前,Argo 布放的剖面浮标情况如图 1 所示^[12]。

Argo 计划每隔 10 天就能提供一组全球海洋 2000 m 深度之上的次表层温、盐度资料,国际上近些年开发的许多气候模式都借由使用 Argo 的这些次表层温度资料,提高了对 ENSO 现象及其相关的气候灾害 (如洪水、干旱等) 的预报能力。

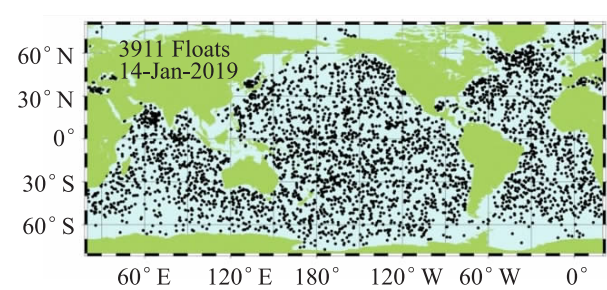


图 1 Argo 布放的剖面浮标情况

Fig. 1 Buoy deployed by Argo in global scope

此外,通过 Argo 观测数据分析降水与蒸发差、冷热差、热量和淡水对流,以及由风驱动的水体重新分配,可以了解 ENSO 所造成的全球海面变化。2002 年 1 月中国正式加入 Argo 计划,希望依托该计划,建成属于中国的大洋局域观测网。截止 2018 年,已经在太平洋、印度洋等海域投放了 423 个 Argo 剖面浮标,目前有 106 个仍在海上正常工作^[13]。

1.1.3 热带太平洋观测系统 2020 (TPOS 2020)

热带太平洋锚系阵列 (Tropical Moored Buoy Array, TMBA) 在 2012—2014 年发生了严重退化,给 ENSO 的预测工作带来巨大风险。因此,2014 年,美国提出了热带太平洋观测系统 2020 计划 (Tropical Pacific Observing System 2020 Project, TPOS 2020)。TPOS 是由 GOOS 延伸出来的,针对热带太平洋的多国联合合作的可持续观测系统。TPOS 2020 计划将于 2020 年完成,旨在提升和重新设计热带太平洋的国际观测系统,提高对 ENSO 的预测能力,并进一步认知和预测热带太平洋气候变异及其在农业、海洋生态系统、人类健康、防灾减灾等领域的全球影响。

2016 年 8 月,TPOS 2020 发布《TPOS 2020 初次报告》。报告指出,TPOS 在 TOGA 开展之后的 20 年中取得了很大的成功,其重新设计得到的 TPOS 2020 是基于 1985—1994 年间的 TOGA 以及

之后对其观测系统的大量更新和改进,该系统利用卫星和现场观测新技术的发展,提供更高的效率、有效性和可靠性。其研究对象包括海洋混合层和与其相互作用的海-气通量、日变化、赤道海-气耦合物理机制、太平洋边界区域,以及生物地球化学(特别是海-气碳通量)。TPOS 2020 针对矢量风、海表面温度(SST)等多种观测目标的监测方法和技术提出了 22 个建议,以及“维持或恢复布放在西太平洋 2°S-2°N 之间的六个 TMA 站点”等多个具体实施措施^[14]。

1.1.4 欧盟资助计划

欧盟发起和资助了一系列与 ENSO 相关的研究计划与项目,其中部分与英、德等成员国的项目存在交叉。

2005 年由德国马普学会等机构联合开展并完成的“全新世期间厄尔尼诺-南方涛动现象的历史重构和建模”(RECOMENTH)项目主要用于理解最近的地质历史中 ENSO 的起因和变化,以提高对 ENSO 变化的预测能力。

2009—2011 年英国牛津大学等机构联合开展的“气候变化对东南亚季风的影响”(ASIAN MONSOON)项目有助于更深入地理解东南亚季风(影响超过 50% 的世界人口),并帮助理解 ENSO 现象与季风之间的关系。

此外,欧盟近些年来发起的多个研究项目都与 ENSO 研究相关,例如 2011—2015 年的“Learning about Interacting Networks in Climate(LINC)”项目、2016 年开始的“ThermoHaline Circulation at Risk(THOR)”项目等^[15]。

1.2 各国研究计划

除了国际组织外,很多国家也在研究部署和国家政策中强调了 ENSO 研究和预测的重要性。

美国国家研究委员会海洋基础设施战略研究

组在国家与国际评估的基础上,于 2011 年 9 月正式发布《2030 年海洋研究与社会需求的关键基础设施(Critical Infrastructure for Ocean Research and Societal Needs in 2030)》报告,确定了在 2030 年可能处于海洋科学前沿且需要解决的若干重大科学问题,以及为解决这些问题需要规划建设的国家海洋研究基础设施。该报告提出,未来对 ENSO 问题的研究很可能把重点放在持续的观察和分析上,以改进预测的模型^[16]。

美国国家海洋与大气管理局下设的 NOAA 太平洋海洋环境实验室(PMEL)、地球物理流体动力学实验室(GFDL)、地球系统研究实验室(ESRL)和气候预测中心都开展了跟厄尔尼诺有关的一系列科研活动,包括基础研究、观测和全球热带观测平台建设。PMEL 最成功的一个气候计划是通过布设在赤道太平洋的热带大气海洋浮标阵列(TAO),提高了对厄尔尼诺的描述、理解和预测。NOAA 气候预测中心目前经常使用 Tao-Triton 数据进行 ENSO 预测,并评估 ENSO 事件对全球天气模式的影响。而地球物理流体动力学实验室(GFDL)开展的厄尔尼诺研究包括:使用不同层次的模型来分析 ENSO 及其对气候敏感性的关键过程;通过了解 ENSO 对过去气候变化的响应,帮助预测其在未来如何变化;大力发展 ENSO 模型和预报系统,除了高品质模型,还通过全球观测网络和先进的耦合数据同化方法等,改善对 ENSO 的预测能力和评估的不确定性^[17]。

澳大利亚环境与能源部制定的“澳大利亚海洋科学与技术规划”将一个研究目标定为改善澳大利亚的气候变化预测,通过开发澳大利亚海洋观测系统的气候模块,监测、分析并预测 ENSO 引起的气候变化。此外,澳大利亚国家科学院(CSIRO)的研究主题之一“海洋环境研究”设置

了对极端气候事件这一研究方向,主要聚焦于厄尔尼诺引起的气候变化对珊瑚的影响和防范,具体包括“Pilbara / Ningaloo 地区沿海环境驱动因素:海洋热浪的作用与热带气旋”等^[18]。

加拿大渔业及海洋部设置了“气候变化与变异”(Climate Change / Variability)这一研究主题,希望通过开展相关研究,更好地了解、监测和预测 ENSO 等引起的气候变化与变异,构建新一代全球气候模型,同时为制定相关战略提供科学依据^[19]。

英国国家海洋学中心(NOC)和德国亥姆赫兹基尔海洋研究中心(GEOMAR)都是全球海洋和气候研究的重要机构,分别针对 ENSO 部署了多个研究项目,例如 GEOMAR“西南非洲沿岸上升流系统和本格拉厄尔尼诺(2013—2016)”等重点项目^[20]。

1.3 中国研究计划

近些年来,中国受 ENSO 引起的气候变化的影响,极端天气、气候事件频发。国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家高技术研究发展计划(863 计划)和国家自然科学基金都资助了多个研究项目,对 ENSO 相关的课题进行不同层次的研究,具体项目有:“平流层大气基本过程及其在东亚气候与天气变化中的作用”(973 计划,2010—2014)^[21]、“热带太平洋海洋环流与暖池结构特征、变异机理和气候效应”(973 计划,2012—2016)^[22],以及“关于季风与 ENSO 循环相互作用的研究”(国家自然科学基金“九五”重点项目,1996—2000)^[23]、“ENSO 的变异机理和可预测性研究”(国家自然科学基金重大项目,2017—2021)^[24]、“厄尔尼诺/拉尼娜形势的发展和物理过程研究”等一系列国家自然科学基金项目。这些项目分别围绕 ENSO 与气候异常的关系及对我

国气候的影响,改进暖池和海洋环流的模拟能力,评估不同类型 El Niño 的可预报性,揭示东亚季风、西太平洋暖池和 ENSO 循环之间相互作用的物理过程,探讨厄尔尼诺多样性的产生机制、ENSO 多变性及其与太平洋年代际变率的关系、ENSO 对全球变暖的响应和反馈以及 ENSO 可预测性等方面展开研究,从厄尔尼诺事件的发生发展机制到其对全球气候的影响再到对 ENSO 事件的预报进行了相关部署与推进。其中,ENSO 的变异机制和预测是研究的重点。

1.4 比较分析

通过对与 ENSO 研究相关的全球研究计划与各国研究计划进行梳理和分析,可以发现,由于观测技术与水平的限制,前期的 ENSO 研究侧重于模拟并在模式研发方面取得了显著进展,随着 2000 年以后 Argo 计划、TPSO2020 计划等全球性观测计划的实施,全球性海洋观测网建设为 ENSO 研究提供了大量的数据研究基础,加快了 ENSO 研究的步伐,也提升了世界各国对 ENSO 引起的气候灾害以及极端气候事件的预测能力。目前,世界各国都已经意识到了 ENSO 研究是全球性的研究课题,不能局限于某个国家或地区,想要提升对 ENSO 事件的预测必须依靠国际合作,依托全球性的研究计划与观测平台,通过合作与数据共享才能取得长足的进步。所以,目前已经有 30 个国家加入了 Argo 计划,这些国家都赞同建立全球浮标阵列的目标和 Argo 的开放数据政策。而在参与 ENSO 研究的国家中,美国率先提出并资助了多个国际研究计划,一直属于领先地位,澳大利亚、加拿大、英国、德国和中国等国也部署了多个与 ENSO 研究相关的计划,基本都侧重于对厄尔尼诺事件的机制和影响研究,以为了实现对 ENSO 事件的有效预测。

2 研究热点分析

2.1 研究方法及数据来源

为了了解 ENSO 研究的热点,使用文献计量学方法对 ENSO 研究论文进行了分析。数据采集自 ISI Web of Science (Science Citation Index Expanded) 数据库,检索策略是 $ts = (("El Nino" or "enso" or "Southern Oscillation" or "El Nino-Southern Oscillation") and pacific)$, 时间跨度为 1900—2017 年。最终共检索到 12999 条数据 (2018. 12. 13), 涉及气象学与大气科学 (4856 篇)、综合地球科学 (1621 篇)、海洋学、环境科学、

地理学、海洋与淡水生物学和多学科科学等众多学科。

2.2 研究热点分析

利用 VOSviewer 根据关键词的共现及相互联系的紧密性对关键词进行聚类分析,将联系紧密的关键词以相同颜色划分为同一区块。可以明显看出,ENSO 研究有 4 个研究热点(图 2),分别是:1) ENSO 的机制研究和其所导致的影响(红色板块),关键词包括大气环流、沃克环流、热带气旋、季风和调制等,涉及地域的关键词包括印度海、西太平洋、东亚以及中国;2) 气候变化的气候模式研究以及 ENSO 引起的洪水、干旱等灾害的

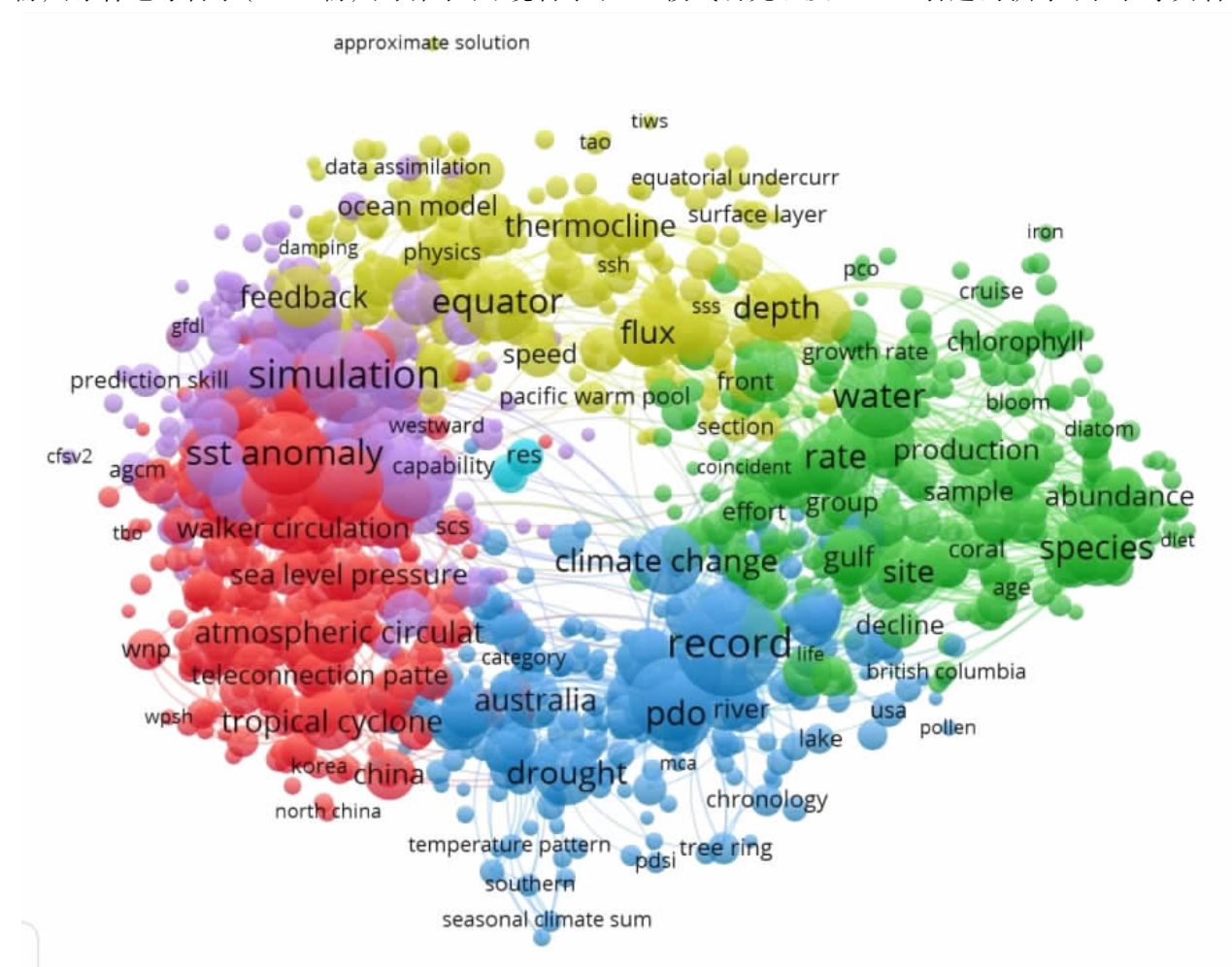


图2 厄尔尼诺研究关键词热点分析

Fig. 2 Hotspot analysis of key words in El Nino Research

影响(蓝色板块),关键词包括太平洋年代际振荡、年降水量、小波分析、北大西洋涛动、重建及年轮等,涉及地域的关键词包括澳大利亚;3) ENSO 的变异机理和可预测性研究(黄色板块),关键词包括赤道、温跃层、风压、暖池、海洋模式、开尔芬波、罗斯贝波、赤道潜流和通量等;4) ENSO 引起的气候变化对海洋生态系统的影响(绿色板块),关键词包括分配、种群、叶绿素、生长、丰度、生态系统和初级生产力等,涉及地域的关键词包括加州、墨西哥、河口和海湾。进行 ENSO 研究所用的方法主要是模拟分析(紫色板块),关键词包括模拟、实验、气候模式和预测等。

通过分析研究论文的关键词得到的 ENSO 研究热点与全球的 ENSO 研究计划部署情况是相对应的。对于 ENSO 的机制,Timmermann 等^[25]研究了 ENSO 气候模式的时空复杂性及其对地球系统的影响,虽然 ENSO 主要表现为一年四季的气候波动,但它的动态涉及到一系列广泛的过程,这些过程在时间尺度上相互作用,研究者通过分析 ENSO 的模式、振幅和时间演变的多样性探讨了 ENSO 的发生和演变机制。对于 ENSO 造成的灾害,Varikoden 等^[26]研究了 ENSO 对印度不同地区干旱灾害的影响和范围;Barnard 等^[27]通过研究 2015—2016 年厄尔尼诺现象造成的异常海洋学条件和海岸反应,发现 ENSO 导致了美国西海岸异常大的海滩侵蚀。对于 ENSO 造成的更广泛影响,Ham^[28]认为全球变暖将增强东太平洋厄尔尼诺事件的振幅和频率,并带来一系列气候变化;L'heureux 等^[5]通过研究 2015/16 年的厄尔尼诺情况分析了对厄尔尼诺现象的观测与预测;蔡文炬等^[29]结合不同的 ENSO 模式模拟,探讨了 ENSO 在未来温室效应下的变化情况。此外,ENSO 引起的气候变化对海洋生态系统的不利影响

也是 ENSO 研究的一个重点方向。McCabe 等^[30]通过研究证明,2015 年春季的产毒赤潮硅藻—拟菱形藻在沿海地区的爆发是由 ENSO 导致的异常温暖的海洋条件所引起,这次藻华引发了北美西海岸有记录以来的最大一次神经毒素—软骨藻酸爆发,导致地理上广泛而持久的刮刀蛤、岩蟹和珍宝蟹渔场封闭;Wooldridge 等^[31]对澳大利亚大堡礁中部的棘海星的初始爆发进行研究,探讨了 ENSO 导致的水动力条件变化对该种生态灾害的影响。

3 展望

ENSO 不仅影响全球气候,还对全球的经济、政治、文化等各个方面都有深远影响。世界气候研究计划 WCRP、全球海洋观测系列计划 GOOS 以及热带太平洋观测系统 2020 计划(TPOS 2020)等国际研究计划都对 ENSO 的观测系统、对气候变化的影响、产生机制以及可预测性等相关研究进行了重点部署,世界各国也纷纷资助和开展了与 ENSO 研究相关的多个研究计划,中国除了资助国内的“ENSO 的变异机理和可预测性研究”等重大研究项目,也积极参与多个相关国际计划与项目。通过对 ENSO 研究的论文发表情况进行分析,可以发现,ENSO 的机制研究和气候模式研究、引起的气候变化对海洋生态系统的影响、导致的气候灾害对农业等方面的影响都是 ENSO 研究领域的研究热点。这与国际上的 ENSO 研究战略部署相对应。

在战略部署方面,为了应对 ENSO 现象的不利影响,各国除了需要继续支持和促进 ENSO 相关学科研究的发展,还应将包括 ENSO 预测在内的气候预测纳入管理决策,从决策层面加快预测手段与技术的进步。如果 ENSO 预测变得如常规

的气候预测那样容易获得,就可以提供可靠的短期、长期和超长期预报,从而帮助国家各层面的决策规划,更好地管理农业、供水、渔业和其他资源。此外,政策制定过程中,在农业、经济、科研、文化等多个方面都应该考虑到厄尔尼诺等事件带来的影响,完善相关的应急预警措施和法律法规,并通过广泛开展科普等活动,加深普通民众对 ENSO 的了解,提高民众对 ENSO 导致的气候灾害事件的预警和防范。

在学术研究方面,过去几十年里,通过各种 ENSO 研究项目的陆续开展,世界各国在 ENSO 的机制研究、变化、影响和预测方面都取得了长足的进步,但是,如何科学地部署观测系统以取得有效的观测数据,如何建立并评估有效的海气耦合模式,ENSO 的具体机制及其在全球变暖条件下的变化与反馈是怎样的,以及如何准确地预测 ENSO 及其导致的极端天气事件,这些问题都尚未解决,依然是科研工作者未来研究的重点和难点,需要通过广泛的国际合作来解决。加强机构和科研人员间的交流合作、数据共享有利于 ENSO 预测模式的完善与发展。此外,还需要建立全球的 ENSO 监测和预报体系,推动气候预测的开展与进步。许多国家的科学家和政府正在共同努力,设计和建立一个观测热带海洋的全球体系,预测 ENSO 和其他不规则的气候变化规律。

参考文献

- [1] MCGREGOR S, TIMMERMAN A, SCHNEIDER N, et al. The Effect of the South Pacific Convergence Zone on the Termination of El Niño Events and the Meridional Asymmetry of ENSO [J]. Journal of Climate, 2012, 25(16): 5566-5586.
- [2] CHRISTOPHER D G H, HUGHES A R, HULT-GREN K M, et al. The Impacts of Climate Change in Coastal Marine Systems [J]. Ecology Letters, 2006, 9(2): 228-241.
- [3] JACOBS G A, HURLBURT H E, KINDLE J C, et al. Decade-Scale Trans-Pacific Propagation and Warming Effects of An El Niño Anomaly [J]. Nature, 1994, 370(6488): 360-363.
- [4] PATZ J A, LENDRUM D C, HOLLOWAY T, et al. Impact of Regional Climate Change on Human Health [J]. Nature, 2005, 438(7066): 310-317.
- [5] L'HEUREUX, M L, TAKAHASHI K, WATKINS A B, et al. Observing and Predicting the 2015-16 El Niño [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(7): 1363-1382.
- [6] WANG, B, WU R G, FU X H. Pacific-East Asian Teleconnection: How Does ENSO Affect East Asian Climate? [J]. Journal of Climate, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018/19 El Niño Advisory [DB/OL]. [2018-11-22]. <http://www.fao.org/3/ca2530en/CA2530EN.pdf>.
- [8] WMO. Progress in Observing and Predicting ENSO [DB/OL]. [2018-11-22]. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/progress-observing-and-predicting-ens0>.
- [9] World Climate Research Programme (WCRP). About WCRP [DB/OL]. [2018-11-22]. <https://www.wcrp-climate.org/>.
- [10] World Climate Research Programme (WCRP). WCRP Core Projects [DB/OL]. [2018-11-22]. <https://www.wcrp-climate.org/core-projects>.
- [11] The Global Ocean Observing System (GOOS). Framework for Ocean Observing [DB/OL]. [2018-11-22]. <http://www.goosocean.org/in->

- dex. php? option = com _ content&view = article&id = 125&Itemid = 113.
- [12] Argo. Current Status of Argo [DB/OL]. [2019-01-08]. http://www.argo.ucsd.edu/About_Argo.html.
- [13] 中国 Argo 实时资料中心. 布放信息 [DB/OL]. [2018-11-22]. <http://www.argo.org.cn/>. China Argo Real-Time Data Center. Deployment Information [DB/OL]. [2018-11-22]. <http://www.argo.org.cn/>.
- [14] Tropical Pacific Observing System (TPOS). First Report of TPOS 2020 [DB/OL]. [2018-11-22]. <http://tpos2020.org/first-report/>.
- [15] European Commission. Horizon 2020 Programme [DB/OL]. [2018-11-22]. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/h2020-sections>.
- [16] National Research Council. Critical Infrastructure for Ocean Research and Societal Needs in 2030 [DB/OL]. [2018-11-22]. <https://www.nap.edu/catalog/13081/critical-infrastructure-for-ocean-research-and-societal-needs-in-2030>.
- [17] NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL). El Niño Theme Page [DB/OL]. [2018-11-22]. https://www.pmel.noaa.gov/el_nino/.
- [18] Australia Government Department of the Environment and Energy. Grants and Funding [DB/OL]. [2018-11-22]. <http://www.environment.gov.au/>.
- [19] Fisheries and Oceans Canada. Reports on Plans and Priorities [DB/OL]. [2018-11-22]. <http://dfo-mpo.gc.ca/reports-rapports-eng.htm>.
- [20] GEOMAR. Topic 1: Ocean Circulation and Climate [DB/OL]. [2018-11-23]. <http://www.geomar.de/nc/en/research/oceans/topic-1-ocean-circulation-and-climate/>.
- [21] 中国科学院大气物理研究所. 平流层 973 项目课题结题验收会在京召开 [DB/OL]. [2018-11-23]. http://www.iap.ac.cn/xwzx/zhxw/201411/t20141105_4247567.html. Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences. The Acceptance Meeting of Stratospheric 973 Project Was Held in Beijing [DB/OL]. [2018-11-23]. http://www.iap.ac.cn/xwzx/zhxw/201411/t20141105_4247567.html.
- [22] 中国科学院海洋研究所. “热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应”获科技部验收优秀 [DB/OL]. [2018-11-23]. http://www.qdio.cas.cn/xwzx/kydt/201708/t20170803_4839396.html. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. “Structures, Variability and Climatic Impacts of Ocean Circulation and Warm Pool in the Tropical Pacific Ocean” was Checked and Accepted as Outstanding by the Ministry of Science and Technology [DB/OL]. [2018-11-23]. http://www.qdio.cas.cn/xwzx/kydt/201708/t20170803_4839396.html.
- [23] 国家自然科学基金委. “关于季风与 ENSO 循环相互作用的研究”取得突出进展 [DB/OL]. [2018-11-23]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab110/info18645.htm>. NSFC. Outstanding Progress in the Study of the Interaction between Monsoon and ENSO Cycle [DB/OL]. [2018-11-23]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab110/info18645.htm>.
- [24] 国家自然科学基金委. “ENSO 的变异机理和可预测性研究”重大项目指南 [DB/OL]. [2018-11-23]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab235/info53693.htm>. NSFC. Guidelines for the Major Project on the

- Study of Variation Mechanisms and Predictability of ENSO [DB/OL]. [2018-11-23]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab235/info53693.htm>.
- [25] TIMMERMAN A, AN S I, KUN J S, et al. El Niño-Southern Oscillation Complexity [J]. *Nature*, 2018, 559(7715): 535-545.
- [26] VARIKODEN H, REVADEKAR J V, CHOUDHARY Y, et al. Droughts of Indian Summer Monsoon Associated with El Niño and Non-El Niño Years [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(8): 1916-1925.
- [27] BARNARD P L, HOOVER D, HUBBARD D M, et al. Extreme Oceanographic Forcing and Coastal Response Due to the 2015-2016 El Niño [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14365.
- [28] HAM Y G. El Niño Events Set to Intensify [J]. *Nature*, 2018, 564(7735): 192-193.
- [29] CAI W J, WANG G J, DEWITTE B, et al. Increased Variability of Eastern Pacific El Niño under Greenhouse Warming [J]. *Nature*, 2018, 564(7735): 201-206.
- [30] MCCABE R M, HICKEY B M, KUDELA R M, et al. An Unprecedented Coastwide Toxic Algal Bloom Linked to Anomalous Ocean Conditions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 19(43): 10366-10376.
- [31] WOLAMIN A, ROZANOV V, DINTER T, et al. Global Retrieval of Marine and Terrestrial Chlorophyll Fluorescence at Its Red Peak Using Hyperspectral Top of Atmosphere Radiance Measurements: Feasibility Study and First Results [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(2): 805-815.