

第 21 章 极地气象 100 年进步

JOHN E. WALSH (美国阿拉斯加费尔班克斯大学), DAVID H. BROMWICH (美国俄亥俄州立大学), JAMES. E. OVERLAND (NOAA太平洋海洋环境实验室), MARK C. SERREZE (美国科罗拉多大学博尔德分校), KEVIN R. WOOD (美国华盛顿大学)

编译: 贾朋群 李婧华

摘要: 极区给气象带来了一些独特的挑战, 包括遥远和恶劣的环境。我们总结了两个半球极地气象的演化, 这一过程始于早期探险阶段进行的观测, 一直到最近几十年以来, 极地气象成为全球核心挑战, 如臭氧洞、天气预报和气候变化。虽然从1800年代和1900年代初的探险中得到一些数据, 以及在亚北极区域仅有少量几个站, 过去100年在观测网建立和对极地区域气象相关认识方面取得了极大的进步。例如, 20世纪早期, 人们一直认为北冰洋被持续的高压环流、冰川反气旋占据。随着观测的增加, 到1950年代已经明了, 尽管反气旋是北极循环的一个常见特征, 气旋也频繁出现在北极的任何地方。技术通过改进仪器让极地气象受益, 尤其是自动化的业务仪器。而且, 卫星遥感和计算模式带来极地气象的革命。我们着重说明了四次国际极地年和最近几十年实施的一些高纬外场项目。我们还注意到巨大的挑战, 包括认识北极在中纬度天气和气候变化中的作用、模拟变化中的北冰洋地表能量交换的能力、评估极区目前和未来极端事件的趋势和极地气候数年到年代变化内部变率的作用等。

第一作者 约翰·沃尔什 (John E. Walsh)



沃尔什现为阿拉斯加费尔班克斯大学国际北极研究中心 (IARC) 的首席科学家。研究方向为极地气候、北极气候变化、极端天气以及气候和天气的关联。

1974 年他从 MIT 博士毕业后加入伊利诺伊大学大气科学系。利用休假期他曾在美国国家大气研究中心 (NCAR)、海军研究生院、阿拉斯加费尔班克斯大学工作。他是政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次评估报告 (AR4) 极地章节的主要作者之一, 《北极气候影响评估报告》雪/冰/水文章节的主要作者。

(编译者提供)

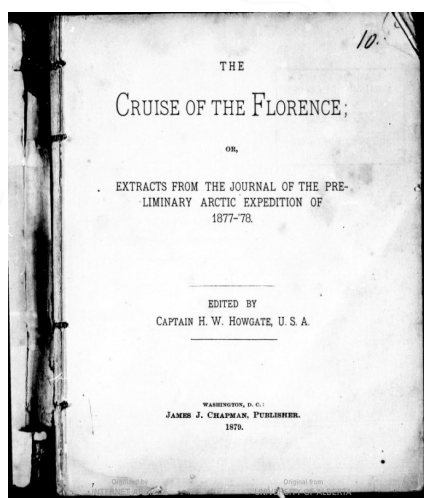
1 引言

极地气象的发展面临独特的挑战, 包括北极和南极遥远和恶劣的环境。1800年代和1900年代初, 探险中以及在亚北极区域仅有少量几个站提供了一些数据; 而在过去100年, 极地气象观测和认识都在加速。除了建立新的观测站, 技术通过改进仪器让极地气象受益, 尤其是自动化的业务仪器。而且, 卫星的空间覆盖和计算模式带来了极地气象的革命, 其中过去半个世纪以来出现的计算模式已经成为广为认可的大气和气候科学的分支。本章中, 我们总结两个半球极地气象的演化, 从早期探险开始的观测截至最近数十年来极地气象成为全球核心挑战, 如南极臭氧洞、天气预报和气候变化。

2 1919年之前 (美国气象学会成立前) 阶段评述

19世纪前极地气象的发展, 紧密地与商业化、领土扩张和地理探险联系在一起。从美国的视角来看, 这些活动始于1838—1842年美国南海探险队 (也称为威尔克斯探险队, 或简称为U.S. Ex. Ex.) (Wilkes 1845a,b), 以及随后较少被人熟知的1853—1956年美国北太平洋探险和测量远征 (Ringgold-Rodgers 探险队) (Ringgold and Rodgers 1950; U.S. National Archives 1964), 两支探险队均从属于美国海军。美国海军参与了找寻在加拿大北部北极岛屿失踪的英国富兰克林爵士, 以及沿格陵兰西岸一些其他早期探险活动, 活动常常得到私人支持。这些活动增加了

有关北极气象的早期知识，主要通过将当时的观测（例如，Kane 1854; Kane and Schot 1859; Tyson and Howgate 1879, 附图1; Bessels 1876）和他们遇见的大气（和冰及海洋）现象的描述，与现代观测数据进行对比，其中的例子包括强烈的逆温和海市蜃楼、冰雾、海冰脊和沟以及漂浮冰岛等。第一次地面逆温的文字记录实际上来自南森的Fram探险队在海面以上32 m处的“桅杆瞭望台”上进行的温度测量（Palo et al. 2017）。陆军信号兵团、海岸测量队和史密森研究所等机构多次支持开展观测，向这些探险活动提供气象仪器和给予专门数据摘编和出版帮助（例如，Abbe 1893）。



附图1 文献 Tyson and Howgate (1879) 封面

威尔克斯探险队抵达南极，但直到1928年第一次伯德探险队才在这一区域开始美国有组织的科学探险（Riffenburgh 2006）。然而在北极，早在1848年就在Chukchi和Beaufort海开始了捕鲸作业，1867年从俄罗斯购买了阿拉斯加，划时代的第一次国际极地年（IPY; 1881—1884）使得极区联合科学考察增加，为北极探险和研究带来持续的动力。

1879年珍妮特号舰遭遇不幸的考察，本来是打算通过假想的“温暖通道”，经白令海峡到达空旷的北冰洋，从而抵达北极（Bent 1872; Hayes 1867），这可能是最后一次因为错误的地理认识——包括北极可能有无冰海洋，而开展的北极地理考察。今天，珍妮特号航母探险为人所知，或者说数年后在格陵兰发现的遗骸为人所知，是因为它启发了南森的Fram号采用与海冰一起漂流的方式穿过北极（Nansen 1898）。一方面，珍妮特号航母和Fram号这类探险活动肯定加快了发现的步伐——虽然经常要付出高昂代价——并产生了极有价值的结果；另一方面，其背后的科学进步的历程在持续不断，甚至常规的测量、描述和绘制陆地

及海洋地图上的资源、天气和气候的工作中得到了更好的体现。创新从开始就是关键要素，并成为持续开发观测深海和高层大气的新工具，还使得在严酷极地条件下，更先进的船只（后来加上飞机）用于常规考察。这期间数百人辛勤收集的广泛数据，其科学价值目前还在探索中。

a 早期对天气和冰的探测

美国最早对北极天气、气候和海洋持续和系统的调查源自购买阿拉斯加（<https://www.loc.gov/rr/program/bib/ourdocs/Alaska.html>）。美国海岸调查和缉私局（美国海岸卫队前身）于1876年启动调查，目的是试图收集导航图和阿拉斯加沿海指南所需信息（U.S. Coast Survey 1869）。1880年开始，缉私局/海岸卫队每年夏天到白令海北部和楚克奇海巡航，过程中收集几乎没有中断的系列海洋气象和海冰观测资料，一直延续到今天（图1）。



图1 1918年“熊号”USCGC（海岸警卫队快艇）停泊在海冰中。“熊号”最早于1884年由海军从Greely Relief探险队购入（Schley 1887），随后直到1928年服役于阿拉斯加的缉私局/海岸卫队，在1933—1940年随Byrd上将探险队驶往南极，最后在二次大战期间归属海军参与格陵兰巡逻。该艇最终于1944年退役

图2给出1867年到1921年期间站网的发展。这些站的观测成为用于认识长期气候趋势的重要部分——基于“自连续记录开始”数据得到的启发。

费雷尔，当时在海岸调查队，随后加入信号兵团，基于物理定律（Abbe 1892）描述了一般大气环流，包括科氏力，远远超前于Teisserenc de Bort（1883）、Exner（1913）、Walker（1923）和其他人的工作。图3给出他分析的1月北半球海平面气压和流行风。同月Dall（1879）的区域图（图4，上），基于费雷尔还无法得到的测站数据，给出更加准确的阿留申低压位置。

特别是1889年得到的白令海峡水道截面，可能是史上第一份（图5）。推动这一工作的部分原因，

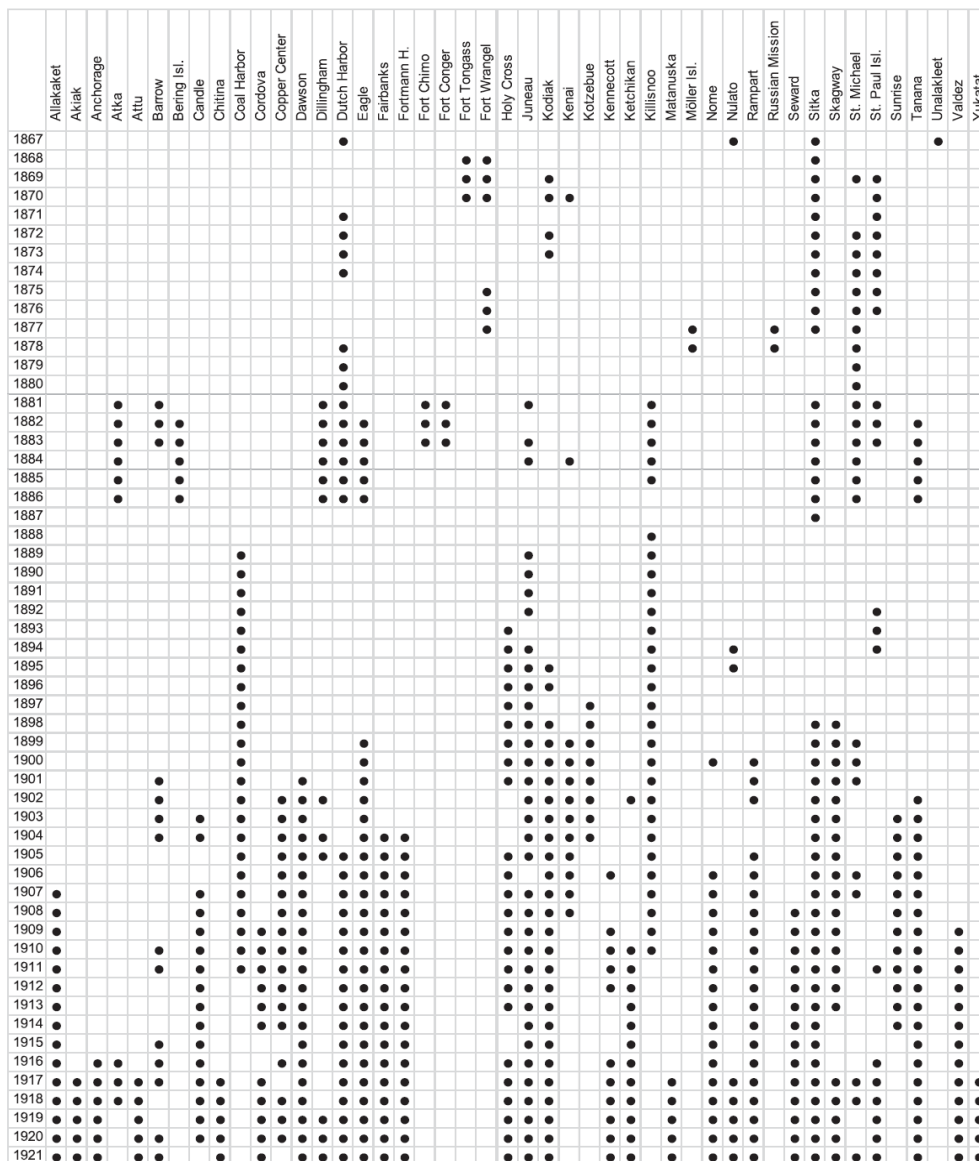


图2 1867-1921年美国陆军信号兵团和天气局在阿拉斯加建立的气象站网。图中还包括了在Fort Conger、Ellesmere 岛和Fort Chimo 建立的IPY 站 (Kuujjuaq, Nunavit)。IPY 时段用灰色线标注。1887 年信号兵团站网的关闭清晰可见

是验证一个假设，即温暖的黑潮通过白令海峡，建立“温暖通道”，美国船舶珍妮特号后来能够从此进入北极 (Bent 1872)。

b 第一次国际极地年

第一次国际极地年 (IPY) 首次试图将气象观测网向北极推进，收集用经过精校准的类似仪器和方法的观测。第一次IPY受奥匈帝国海军军官和科学家Karl Weyprecht作为联合指挥官参加的1872—1874年北极探险的启发 (Wood and Overland 2006, 附图2)。回国后，他强调获得的数千条气象观测的价值，号召进一步大规模同步数据收集。1879年的第二届国际气象大会支持这个设想，最终由11个国家建立了14个气象

站。但相关数据直到1910年才全部发表。

c 天气局开展的北极工作

美国天气局阿拉斯加分局1898年正式建立，提供气候和作物服务，并在Sitka建立了一个一流天气站，由H. L. Ball (Ball 1898, 附图3) 负责。从信号兵团年代末到1920年代，该地区大量气象数据都是由志愿观测者收集的。除了Sitka站，又有10个辅助站可望由志愿者运作。Henry (1898, 附图4) 还记录了以下内容，“期待前几年几次领到仪器的人能够重新提起兴趣，向Ball报告天气数据。”天气局向18个志愿站发送了仪器，最为成功的站位于煤港 (1889—1911年) 和 Killisnoo (1881—1910年)。其他地方的站不成功。

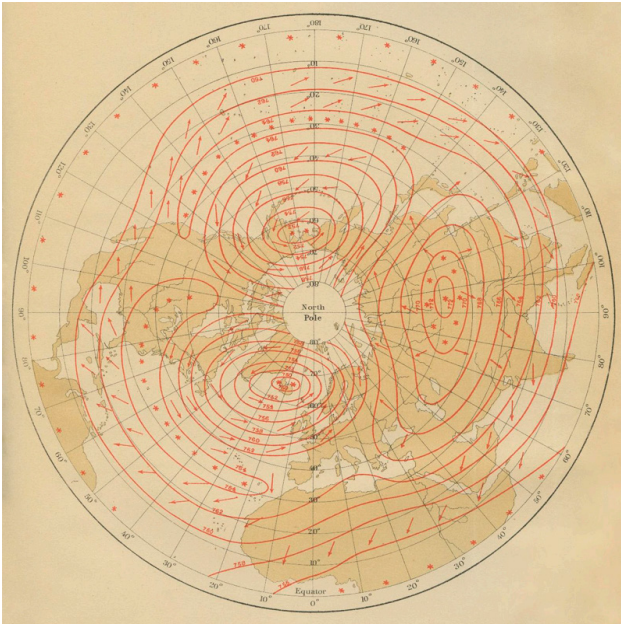


图3 Ferrel《用于沿海导航的气象研究报告》地图 (Ferrel 1875) “展示了用1月北半球大气平均气压毫米等值线，简化为 45° 线平行重力，箭头给出盛行风向。”虽然如其同事 Dall 所言，太平洋活动中心（阿留申低压）太偏北，这张图整体上与现代结果（见，例如，Hurrell et al. 2003，其中的图1和图2）无异

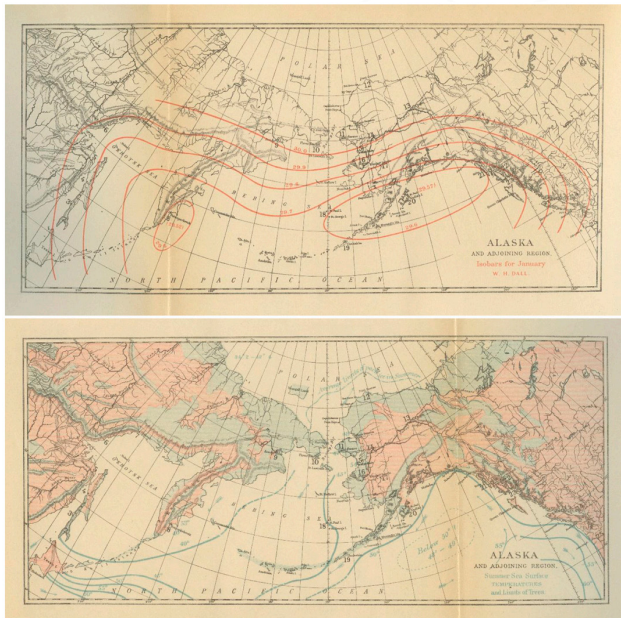


图4 (上) Dall(1879) 给出的1月气压区域图中显示的阿留申低压拆分 (Dall 指出一般位于 Kadiak 地区，当拆分发展时出现在勘察加地区)。Dall 意识到阿留申西侧数据不足使得这一问题留有疑问，然而今天看来，这是一个正确的解释 (例如，Rodionov et al. 2005)。(下) Dall(1879) 给出的夏季海平面等温线和主要海洋洋流。图中还给出夏季海冰平均范围，并且与卫星时代早期及之前关于海冰分布的认识一致 (例如，Danske Meteorologiske Institut 1900—1939, 1946—1956; U.S. Hydrographic Office 1946)

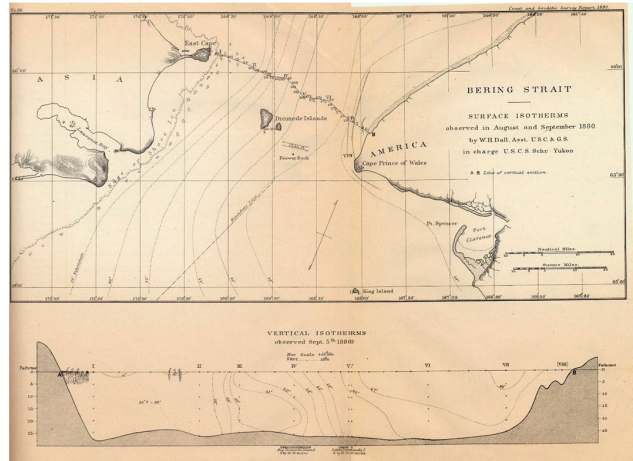


图5 (上) 白令海峡区域地图中给出美国海岸测量船 Yukon 号 1880 年 8 月/9 月测量的地表等温线和海冰；(下) 1880 年 9 月 5 日得到的水道截面 (Dall 1882)



FIG. 1. (a) Map showing the locations of the 12 principal research stations established in the Arctic during the first IPY. Observations were also collected in at least 13 auxiliary locations that are shown here. (b) Twelve Arctic research stations were established during the first IPY. More than 700 men incurred the dangers of Arctic service to establish and relieve these stations between 1881 and 1884. Photo of Fort Rae (date unknown: University of Alberta 2006, Julian Arthur Mills Fonds item number 78-45-165, available online at www.ualberta.ca/ARCHIVES/).



1886 | BAITS | DECEMBER 2006

附图2 (a) 第一次 IPY 期间北极建立的 12 个核心研究站点分布，以及 13 个辅助站地点。(b) 第一次 IPY 期间建立的 12 个北极研究站

WEATHER BUREAU SERVICE IN ALASKA.

THE MONTHLY WEATHER REVIEW for April gave some account of the proposed establishment of an Alaskan section of the Climate and Crop Service, under the direction of Mr. Hector L. Ball. The following interesting letter has been received from him:

SITKA, ALASKA, June 15, 1898.

Prof. WILLIS L. MOORE,
Chief of Weather Bureau,
Washington, D. C.

SIR: I have the honor to inform you that a location has been secured for at least six months, and that the instruments have been placed in position. Observations of temperature and rainfall were begun at 8 a. m. this date. The office room has not yet been papered and cleaned, hence the barometer has not been hung, but this will be done in about three days. The location is an ideal one, being on the top of a hill about 125 feet above mean tide, and about one-fourth of a mile from the bay. This will apparently give temperature and rainfall values that will be unaffected by the ocean and free from mountain currents. The office building is very small, the Weather Bureau office being 8 by 15 feet. However, we were very fortunate to secure so good a location, as some officials are yet without office quarters. No definite arrangements have been made for quarters after the end of the present lease, but it is hoped that the present quarters can be re-leased.

The office roof would not permit of a platform, it being too small and insecure. Accordingly, I have had erected a platform 20 by 20 and 6 feet from the ground. This holds the anemometer and wind vane and the sunshine recorder. The instrument shelter I have erected over sod. As soon as a suitable day arrives photographs will be taken of the building and instruments, and a copy will be sent you. The elevation will also be taken and recorded. As stated in a former letter one barometer was broken in transit, so I have no means of determining the error, if any, of the one in use.

I have everywhere been cordially received by the people of this Territory. The establishment of a Weather Bureau and Experiment Station meets the wishes of every one, and will doubtless be of great value to those living here and to people of other countries.

Thus far the weather has been very delightful; the first half of June having been unusually warm, dry, and sunny. Vegetation is marvellously rich and abundant, and were it not for sudden changes, cool nights, and the prevailing cloudiness this would make a fine agricultural and residential country.

(Signed)

H. L. BALL,
Section Director.

附图3 文献(Ball 1898)全文

d 早期南极观测

在美国关注北极的同时,在南极开展了重要工作,主要是其他国家完成的。南极主要气象工作始于两次历史探险。第一次是Robert F. Scott试图首先到达地理南极点(1910—1913年)活动。Scott的探险队1912年在罗斯冰盖折戟,之前他们较Roald Amundsen晚1个月到达南极点。这一过程中天气对悲剧发生的作用直到今天还有争议(Solomon 2001; Fogt et al. 2017, 附图5)。George C. Simpson收集了1911—1912年罗斯岛Evans海角气象观测详尽记录,他后来成为英国气象局主任。观测的报告和分析因第一次世界大战被延误,却在印度发表的系列档案中出现(Simpson 1919, 1921, 1923)。分析的重要性在于揭示了西南极“气压波”的起源(Loewe 1967),并成为IGY(1957)期间建立Byrd站(80° S, 120° W)的原因。尽管观测是不连续的,Byrd站早期观测使得近期研究展示了自IGY以来,1958—2010年温度从2.2℃升高到1.3℃的温度剧烈增加(Bromwich et al. 2013, 2014)。

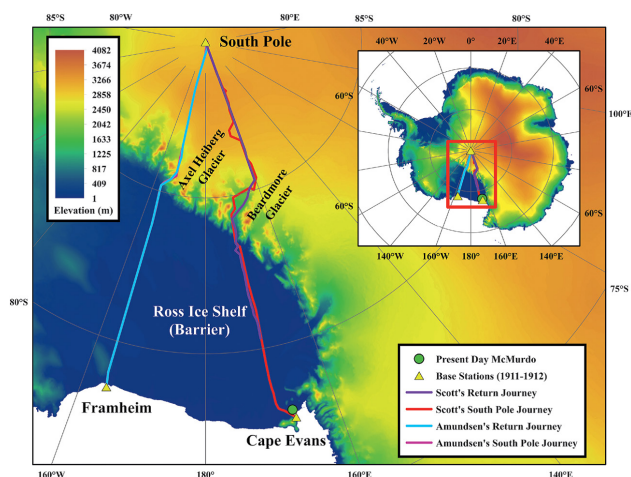
e 历史气候学的现代复兴

近年来,稀疏输入再分析和再分析带动的模拟和重建技术,使得对过去从没有融入现代大尺度数据库(例如,国际综合海洋-大气数据集(ICOADS);国

Index of records of meteorological observations made in Alaska from the earliest dates to January 1, 1898.

Stations.	Latitude.	Longitude.	Elevation above sea level.	Record.			Remarks.
				Length.	From—	To (inclusive)—	
	° ' "	° ' "	Feet.	Yrs. Mos.			
Point Barrow (Ooglaamle).....	71 17	156 40	17	2 0	Sept., 1832	Aug., 1854	Temperature (maximum, minimum, mean).
				1 9	Oct., 1841	Aug., 1883	2d order.
				1 0	Aug., 1880	July, 1893	3d order.
Omlak (Nuklukayot, Tanana).....	65 00	162 57	1	1 0	Jan., 1884	April, 1885	3d order, one observation daily.
Tuklukyet (Nuklukayot, Tanana).....	65 10	152 45	3	3 3	Aug., 1882	May, 1886	3d order, two observations daily.
Belle Isle (Tchatowklin).....	65 30	142 38	2	2 2	Oct., 1882	May, 1886	Do.
Fort Reliance.....	64 10	139 25	1	1 6	Sept., 1880	May, 1881	Temperature, wind, weather.
				1 6	Sept., 1882	May, 1886	3d order, one observation daily.
Fort St. Michael, on St. Michael Island.....	63 28	161 48	30	2 0	Aug., 1842	July, 1855	Temperature observations at 8 a. m., 3 and 9 p. m.
Mission.....	62 55	161 05	13	0 0	Oct., 1865	June, 1874	Pressure, temperature, rain, snow, wind, weather.
Anvik.....	62 37	160 08	2	2 3	June, 1874	June, 1886	3d order, full reports.
				2 3	Aug., 1883	May, 1886	3d order, one observation daily.
Redoubt Kolmakof (Koskokvim).....	61 50	157 58	0	2 2	Sept., 1882	May, 1885	Do.
				2 9	Sept., 1887	May, 1891	Fragmentary records.
Fort Kenai (Kenai).....	60 32	151 19	80	0 2	Dec., 1843	Feb., 1844	Temperature and weather.
Port Etches.....	60 18	146 30	3	3 5	July, 1882	May, 1886	3d order, two observations daily.
Fort Alexander.....	58 57	158 18	38	3 0	July, 1870	Aug., 1870	Temperature, rain, snow, clouds, and wind.
Chilkat (Pyramid Harbor).....	58 30	135 30	0	11 1	Jan., 1883	May, 1886	3d order, two observations daily, aneroid barometer.
Juneau (Harrisburg).....	58 19	134 28	6	2 2	Aug., 1881	June, 1885	Do.
				3 8	July, 1885	Aug., 1884	3d order, two observations daily.
St. Paul Island.....	57 10	170 01	40	5 1	Aug., 1880	June, 1885	2d order, mercurial barometer.
Do.....	57 10	170 01	57	1 9	Sept., 1881	Dec., 1887	3d order, two observations daily, aneroid barometer.
				8 8	Aug., 1872	May, 1883	3d order, two observations for a portion of the time.
Ugashik.....	57 38	157 45	2	3 3	Sept., 1892	June, 1895	Temperature, precipitation, relative humidity, clouds, wind, and weather.
Killsnoo (Hoochnahoo).....	57 22	134 29	13	6 6	Aug., 1883	Jan., 1886	Temperature.
				13 6	May, 1881	Mar., 1898	Temperature, rain, snow, and wind.
Sitka.....	57 03	135 19	63	45 2	Aug., 1872	May, 1883	2d order, full observations.
				6 5	Sept., 1892	June, 1895	Pressure, temperature, wind and weather, ocean swell (Alaska Commercial Company).
Bering Island.....	55 12	165 55	20	5 0	Jan., 1828	Dec., 1876	3d order, one observation daily.
Marshovo (Marzovia).....	55 03	163 10	1	5 0	April, 1881	Sept., 1887	Do.
Unalaksa (Ilululik Village).....	53 53	166 32	13	2 3	May, 1882	May, 1886	3d order, one observation daily.
				6 2	Nov., 1881	May, 1883	Pressure, temperature, rain, snow, clouds, vapor pressure, wind.
				8 10	Jan., 1825	May, 1834	2d order, full observations.
				2 3	Nov., 1896	Sept., 1874	Do.
				6 2	Aug., 1878	May, 1886	3d order, one observation daily.

附图4 最早始于1898年1月1日阿拉斯加气象观测记录(部分)



附图5 Scott和Amundsen南极探险路径及关键地点。
Scott回程仅给出直到1912年5月10日开展气象观测

际地表压力数据库 (ISPD)) 的数据又有了新兴趣。意外的是, 美国海军、缉私局/海岸卫队及其他联邦船只收集的1880年代以来大量海洋-气象和海冰数据却从没有从最初来源和编辑形式提取出来。在地球大气环流重建 (ACRE) 项目下的合作数据恢复计划 (Allan et al. 2011) 的支持下, 和通过民间学者参与到“过去天气” (Old Weather, <http://www.oldweather.org>) 活动及类似计划 (Freeman et al. 2016), 这方面的不足得到改善。

数据丰富的联邦日志只是近期才被“过去天气”民间学者注意到并应用于当前的研究 (Schweiger et al. 2018, 投送给J. Geophys. Res. Oceans的稿件)。因此, 一个世纪之前来自Bear号、Corwin号、Thetis号、Northland号和其他联邦船只日志的数千海冰观测被收集起来, 这些数据被赋予新用处, 这对于最初采集这些记录的人来说是不可思议的 (图6)。

3 从1919年到1940年代

系统的北极飞机观测始于1929年, 当年苏联极地

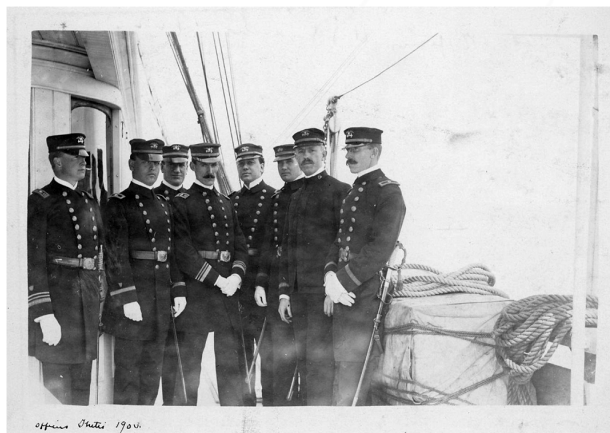


图6 1903年USRC的Thetis号船官员

飞机编队建立 (Polyakov et al. 2003)。1920年代还出现了北大西洋副极区海冰减少, 以及对海冰减少导致气象活动变化的初步推测 (Wiese 1924)。美国位于挪威卑尔根领事1922年10月向美国国务院的报告, 说是写于2000年代初的也不奇怪。

北极似乎在变暖。依据来自渔民、海豹捕猎者和在北极斯匹次卑尔根岛及北极东北航行的探险者的证据, 都表明气候将有巨变, 因此, 地球表面的这部分将出现前所未有的高温。然而, 海洋学观测更令人感兴趣。冰况异常。事实上, 如此少的冰前所未见。探险队几乎创下纪录, 在北至 $81^{\circ}29'N$ 无冰水域航行。这是现代海洋设备历史上到达的最北地点 (Ifft 1922)。

a 第二次国际极地年 (1932–33 年)

对北极兴趣的增加带来了1932—1933年的第二次IPY。主要目标是调查在极区如何观测才能改进天气预报, 从而保证飞行和海运安全。第二次IPY还部分由极区电磁过程的认识驱动, 这些过程影响电报、电话和电力线。此外, 探空等新仪器和飞机及机动交通工具用于海洋和陆地运输为观测带来了新机会, 包括对地面以下的探测。至少在第二次IPY部分时间里, 至少有总计94个气象站在北极运行 (Laursen 1959)。

b 俄国北极站

尽管第二次IPY的目标是北极观测和测量以改进预报, 1930年代也出现了最初试图认识北极在1920年代和1930年代变暖的探索。Ifft (1922) 报告是最早指出这一值得关注气候事件的研究之一, 如图7所示, 20世纪早期变暖后, 是数十年变冷期, 接着是最近数十年来的强变暖。

4 从1940年代到1970年代 (冷战时期)

a 第二次世界大战

第二次世界大战导致气象服务的快速膨胀。1939

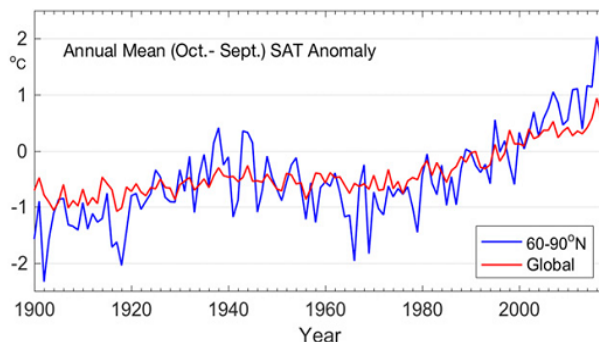


图7 60° — $90^{\circ}N$ (蓝色曲线) 和全球 (红色曲线) 年平均 (10月至9月) 气温异常的时间序列。异常指相对1980—2010年平均。北极和全球时间序列均基于CRUTEM4数据集中存档的陆地站地面气温测量

年，加拿大关注的是满足对横穿加拿大航线增长的需求。战争伊始带来额外的需求，尤其是支持加拿大皇家空军（RCAF）、英联邦飞行培训计划和美国陆军航空队跨大西洋和向阿拉斯加的运输活动。在加拿大北部，美国援助建立了观测站和预报办公室（Thomson 1948; Thomas 1971）。1940年开始，在德国占领了丹麦之后，格陵兰沿海建立了几个站；这些站包括了适当位置上的天气站，比如在Thule和Scoresbysund建的站。当时与丹麦驻美大使签订协议将防卫格陵兰的丹麦殖民地。1941年，当德国入侵苏联，巴伦支海具有了战略上的重要性，导致德国、英国和挪威的一系列试图控制Svalbard的行动，该地的数据对于提供预报欧洲中部天气和攻击往来于俄国摩尔曼斯克的大西洋护航队非常关键。在这场“天气战争”中，德国在Svalbard以及格陵兰东北部和Franz Josef地群岛建立了几处秘密站（<https://www.spitsbergen-svalbard.com/>）。

b 格陵兰早期工作

从1949年9月到1951年8月，法国极地考察队由Paul-Emile Victor带领携带风和温度探测仪器到达格陵兰中央站（Station Centrale, 70.9°N, 40.6°W, 海拔2965 m）（例如，Bedel 1954）。该站靠近魏格纳的“冰中场（Eismitte）”站（1930—1931年），紧挨着冰川顶峰。对在强逆温条件下收集的廓线的研究，使得Schwerdtfeger（1972）推断：倾斜反转气压梯度力因倾斜地形冷空气的出现而存在，这一机制解释了南极高纬内陆风场规律，还适用于格陵兰内陆，表明它们的动力机制是相同的。

c 南极早期工作

1900年代早期的南极探险活动后，气象研究进入一段进展缓慢时期。伯德（Richard E. Byrd）带领3个探险队到达罗斯冰架东缘的小美洲区域，开始设立基地，准备1929年飞机跨越南极点。所有探险都加入了深度气象项目，包括高空观测。或许最重要的进展发生在1946年美国海军在二战后解散前。1946—1947年美国海军南极考察队，在被称为跳高行动（Byrd 1947）中，策划绘制世界上第一张覆盖几乎完整的南极外围地区的地图。在海军少将伯德的带领下，很多海军船只和飞机加入其中。获取的信息和相关的照片为18个月的IGY（1957—1958年）建立运行南极沿海站网打下了基础，这也标志着南极可持续的仪器观测的开始，也开启了这一遥远大陆的很多气候记录。

d 冰川反气旋

尽管在整个战争期间对北大西洋和阿拉斯加的

气候和天气信息的需求都很关键，对北极中心气候和天气依然欠理解，数据稀少。一个长期观点是北冰洋被一个大型永久的反气旋环流占据。第一次由von Helmholtz（1888）提出，该观点又被Hobbs（1910, 1926）用作作者的“冰川反气旋”理论详细描述，并成为主流。Jones（1987）注意到，第二次世界大战期间美国历史天气图系列，直到1930年在北冰洋包含较大的正气压偏差，到1939年偏差小了一些。看起来这些天气图的绘制者并未受到很好的培训，分析外推到资料稀疏的北极中部时，先验地认为那里是一个高压环流。

e 增加的资料网

随着苏联NP浮标站在北极海冰区布设，美国浮标站和雷鸟系列飞机探测，天气站在加拿大北极地区建立，以及1957年IGY对研究的促进，观测网开始得到改进。一个关键的需求是更好地覆盖北冰洋。苏联NP-2站，由Mikhail Mikhailovich Somov（苏联英雄，列宁三级勋章获得者）领导，于1950年4月建立，NP-3站1954年运行。从1954年开始，每年有1个到3个NP站同时运行，收集所有类型的气象数据，包括探空仪大气探测。美国维持一些浮标站，主要是T-3（也称为“Fletcher的冰岛”，以发现者Joseph O. Fletcher上校的名字命名）。1952年开始，T-3作为科学漂浮站，包含房屋、一个发电房和有轮飞机的跑道。T-3是一个扁平的冰山，可能是Ellesmere岛北岸的小冰架崩裂形成的。NP站位于各种冰岛（扁平冰山）和厚浮冰上。

雷鸟是系列飞机巡查项目，由美国空军于1950年到1961年间开展。该项目包括收集由搭载在降落伞上的下投探空仪探测的北冰洋对流层低层数据（Kahl et al. 1992）。

另一个加拿大观测网改进的主要推手，是1950年代建立的远程早期预警（DEW）线。DEW线是跨加拿大北极地区沿线上的雷达站系统（一些站位于已有的村庄，例如，1955年在Cambridge湾建站），试图提供苏联轰炸机进攻的早期预警。其他站在北部海岸线和阿拉斯加阿留申岛，以及格陵兰、冰岛和法罗群岛等地建立。

f 思路的发展

第二次世界大战后，在McGill大学出现了两个主要的加拿大研究机构：一个是物理系由J. Stewart Marshall和R. H. Douglas领导的雷达气象团队，另一个是地理系由F. K. Hare领导的北极气象团队。两个团队在1959年合并组成气象系。McGill大学成为该阶段研究北极气象和气候的主要力量。到1958年（合

并前), McGill大学北极气象研究组就北极气象, 利用增加的观测网优势发表了数篇关键报告(例如, Wilson 1958; Hare and Orvig 1958)。

g NWP 和气候模式

到1940年代, 通过Bjerknes、Rossby和其他学者的研究, 控制天气过程的物理机制被很好地认识到, 这些认识也带来了一些预报技巧, 这在战争年代是十分关键的。广泛研究的“D-Day”天气预报是一个天气预报决定战争走向的很好例子。但是, 成功的数值预报还得等待数字计算机的出现。美国第一次成功出现在1950年, Jule Charney和John von Neumann领导的团队利用ENIAC计算机解正压涡度方程(https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_numerical_weather_prediction)。在英国, 1952年开展了第一次数值天气预报。美国业务化数值天气预报始于1955年, 英国则开始于1965年(<https://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/history-of-numerical-weather-prediction>)。同一年, Norman Phillips完成了两层、半球、准地转计算模式, 被认为是第一个大气环流模式(AGCM; Phillips 1956)。

h 国际地球物理年(第三次国际极地年)

IGY, 也称为第三次IPY, 始于1957年7月, 止于1958年12月。IGY是全球收集包括两极在内的地球物理数据的全球努力。它标志着在很多创新技术涌现时, 科学发现新时代的到来。格陵兰和高层大气是北极活动的重点, 而IGY对南极来说是分水岭事件。天气站被设立在南极全大陆(图9)。IGY标志着南极可持续仪器观测的开始, 因此也开启了这一遥远大陆的很多气候记录, 例如Met READER数据库中的变量(<https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/data.html>)。

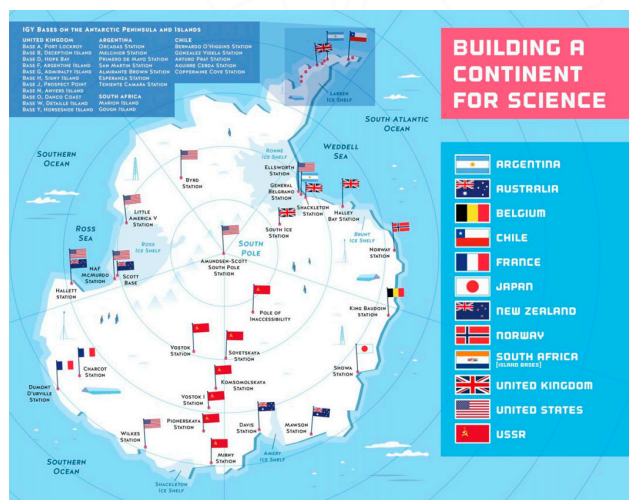


图9 IGY期间运行的南极站的分布。国旗表示运行该站的国家

在小美洲站建立了一个国际分析中心, 绘制了南极和南大洋第一张地面和高空天气图(Moreland 1958)并每天进行一次广播。一些参与者(例如, H. van Loon和P.D.Astapenko)后来让南极气象取得重要进展。IGY期间第一颗卫星发射, 预期了全面卫星网的开始, 后者成为今天现代南半球高纬度数值天气预报的基础。

5 从1970年代至今(现代/卫星时代)

自1970年以来, 极地气象的进步获得极大加速, 这主要是计算机模拟、卫星遥感和自动化仪器进步的结果。下面概要介绍这些进展, 还给出一些全球重要天气和气候挑战, 在这些挑战中, 上述进步在科学认知, 以及至少在一个案例(南极臭氧洞)和减缓行动中至关重要。

a 全球天气试验: 第一次 GARP

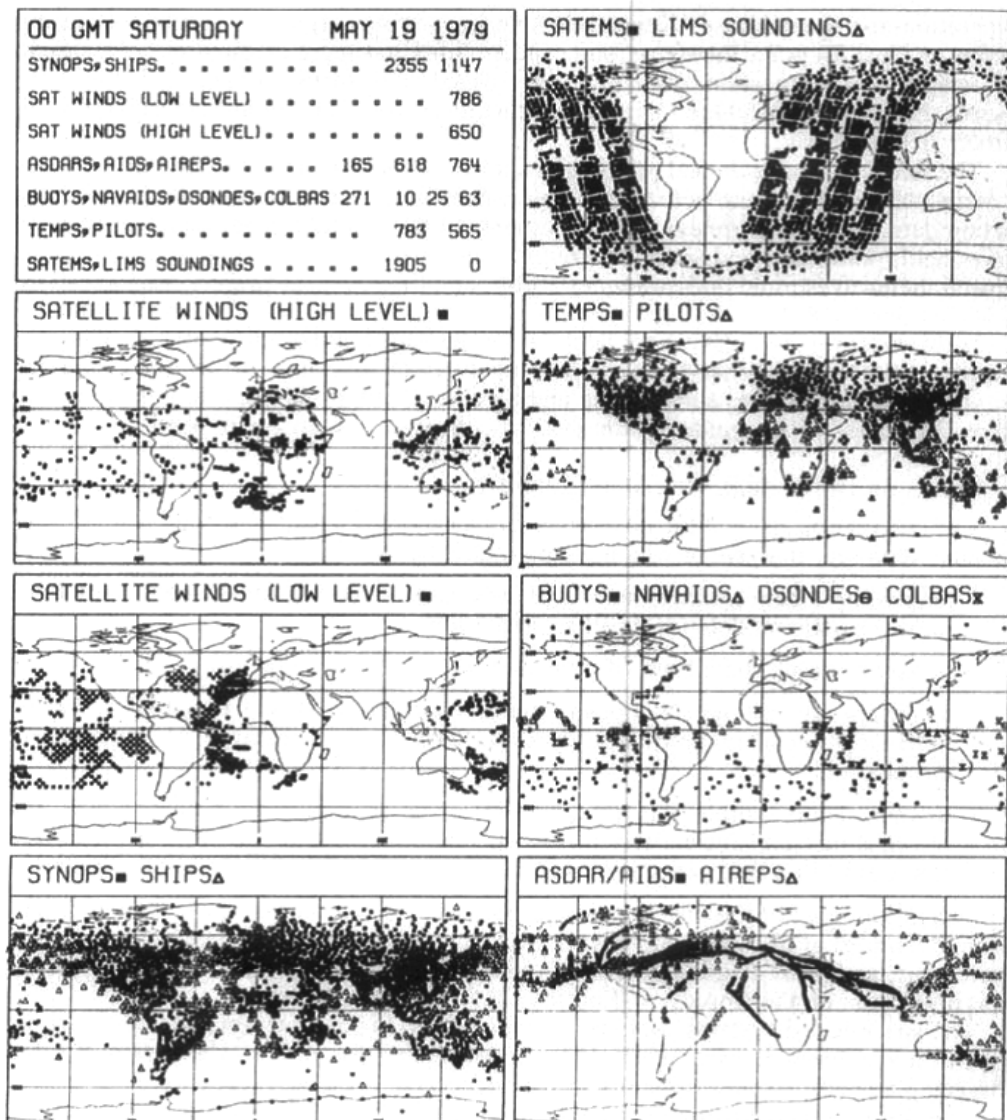
1970年代早期, 全球天气试验, 最开始称为全球大气研究计划(GARP)第一次全球试验(FGGE), 带来一些天气预报的重大进步。在阐述其意义时, Hollingsworth(1989, 附图6)指出, FGGE的主要目标是在一个完整年里描述全球大气行为, 大幅度强化全球尺度数值天气预报, 并为这一目标设计一个最佳的观测系统: “实际上, 观测项目的目标, 是在水平大约为500 km分辨率上描述全年大气动力和热力机制, 垂直分辨率则尽可能高。试验的主要关注点在热带, 以及南半球。”

b 发现和认识南极臭氧洞

平流层南极臭氧洞1980年代中期由英国南极局学者(Farman et al. 1985)利用自IGY开始在哈雷和阿根廷岛站开展的地基Dobson光度计观测得到的臭氧总量资料发现。这一严重的臭氧耗损随后被1978年开始业务化的Nimbus-7卫星上的仪器确认为是南半球春季南极范围的现象(Stolarski et al. 1986); 直到Farman等人的论文发表, Nimbus-7臭氧反演数据过度保守的处理过程掩盖了臭氧洞的存在。随后, 卫星观测给出南极臭氧洞的全面分布及其变率。

c 国际北极浮标项目

监测北冰洋天气和海冰的一个重要里程碑, 是提供天气尺度海面气压、海面温度和冰运动的自动化数据浮标网的建立(Thorndike and Colony 1981)。依据国家科学院的建议, 北极海洋浮标项目在全球天气试验(第5a节)支持下在1979年初开始布设海冰表面上的浮标站。在华盛顿大学应用物理实验室的极地科学中心的协调下, 该项目1991年改为国际北极浮标项



附图 6 1979 年 5 月 19 日 0000 ~ MT 前后 3 小时全球资料分布, 该时间为 sop-2 加密时段。观测系统为: SATEM- 温度和湿度卫星探测; SATELLITE WINDS: 350 hPa 高度或以上 (HIGH) 和 850 hPa 以下 (LOW) 云轨迹矢量; TEMPS- 无线探空; PILOTS- 气球风探测; BUOY- 浮标站气压和温度; NAVAID- 船只气球 Omega 风探测; DSONDE- 飞机下投探空, 通常在大约 250 hPa 层飞行; COLBA- 不变层气球轨迹卫星修正, 飞行高度在 130 hPa 或 900 hPa; SYNOP and SHIP- 常规天气观测; ASDAU AIDS- 卫星 ASDAR 风报告或 AIDS 导航系统数据

目 (IABP; <http://iabp.apl.uw.edu>), 支持单位包括美国多家机构及其他国家。浮标项目业务化运行已达 40 年, 其应用包括了实时业务支持, 数据进入再分析, 并且覆盖了天气、季节循环、年际变率和气候变化不同尺度的诊断研究。

最早浮标携带仪器, 布设到冰面上对大气压力、气温和位置进行观测。通过卫星进行频繁 (大约每小时) 间隔的通讯, 大气观测一直是准实时的, 可以输入模式用于预报或再分析。浮标站随时间的位置变化可以计算冰移动速度。在 IABP 的最初数十年的大部分时间里, 北冰洋保持 20~30 个浮标站运行 (图

11), 更加准确的海平面气压和海冰速度场被建立。

d 南极自动气象站

直到 1980 年, 直接地面和高空气象观测都是由与 IGY 建立的有人观测站网 (图 9) 几乎一样的观测网提供的。威斯康星大学麦迪逊分院的 Charles R. Stearns 领导了卫星传输自动气象站 (AWS) 网的实施 (Lazzara et al. 2012)。主要由 NSF 资助的南极 AWS 网, 目前包含大约 60 个主要由威斯康星大学维持的活跃的站点。AWS 点主要观测气压、温度、风和大气湿度, 观测高度在地面以上 2~3 m, 观测间隔为几分钟, 但是观测

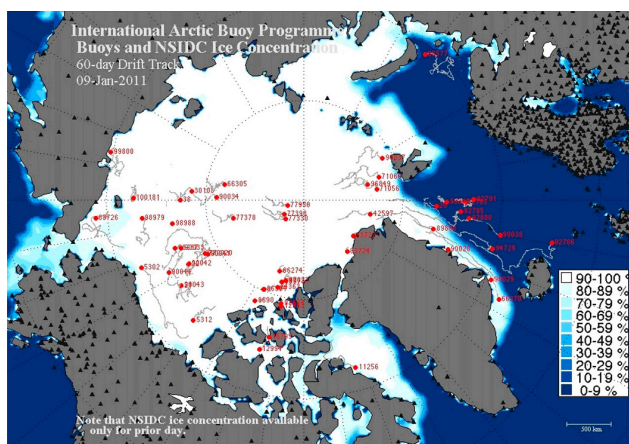


图11 作为IABP网络的一部分的浮标分布(2011年1月9日)。
灰色线条显示过去60天的浮标轨迹

要素一直在增加。AWS网已经扩展到很多国家支持的覆盖南极的超过100个站, 这些国家除了美国以外, 还有澳大利亚、法国、英国、中国、日本和意大利。

e 北极云

北极云及其辐射相互作用成为气候研究议程中的关键内容。在北极大多数时间里出现的云对地表有强的加温影响, 而在短暂的夏季有冷却作用。负云辐射强迫时长, 可以从北冰洋中部的数周到亚北极陆地区域的数月 (Curry et al. 1993; Schweiger and Key 1994; Curry et al. 1996)。

f 卫星导出的大气探测

地球大气气体和云发射的辐射被极轨卫星在红外和微波波段记录下来。这些发射能够用来推断整个大气层的温度和水分含量, 基于放射权重函数。全球大气温度和水汽含量廓线被地基观测获得并提供给数值天气预报。这些廓线在极地尤其珍贵, 探空站在极地海洋甚至陆地上都有巨大欠缺。

大气探测卫星时代主要始于1978年全球天气试验中TIROS-N航天器的发射 (<https://science.nasa.gov/missions/tiros>)。该平台包括了第一部TIROS业务化垂直探测器 (TOVS), 包括高分红外辐射探测器 (HIRS)、微波探测器 (MSU) 以及其他卫星上的平流层探测器 (SSU)。

g 第四次国际极地年 (2007—2009 年)

据Krupnik et al. (2011), 2007—2008年国际极地年 (IPY) 由ICSU和WMO共同组织, 成为在IGY旗帜下地球极区最大的协调研究项目。估计有来自60多个国家的5万名研究者、当地站观测员、教育工作者、学生和支持人员参与其中, 实施228项国际IPY项目 (170项科学数据管理, 57个教育扩展项目) 及相关的国家计划。

h 再分析和极区

全球再分析为调查资料稀疏的极区的气候变率和变化提供了有价值的工具, 例如, 探索南极雪累积量的空间和时间变率 (Medley et al. 2013)。这些再分析数据库通过将短期数值天气预报与大量各种地基、飞机和基于卫星的大气观测合并得到, 同时考虑预报和观测两者的不确定性。但是, 使用再分析数据研究极地气候变化时有一些重要问题。尽管数据同化系统和预报模式没有改变, 人工改变/趋势可能因为观测系统在改变而出现。这一敏感性在南极高纬会提升, 因为在1979年全球天气试验前直接气象观测很有限 (例如, Bromwich and Fogt 2004)。例如, 1978年末卫星大气探测数据的引入使得 ERA-40全球再分析模拟的南极降水减去蒸发 (P-E) 出现跳跃 (例如, van de Berg et al. 2005)。即使现代卫星探测期 (1978年以后), 1990年代后期基于AMSU数据辐射同化, 使得MERRA全球再分析的降水预测出现很显著的跳跃 (例如, Bromwich et al. 2011a)。

i 北极放大效应和近期北极变暖

北极放大效应, 是指北极变暖和变冷快于北半球其他地区和全球平均, 已成为气候研究的主要问题。图7通过给出北极和全球1900年以来年温度展示了这种现象。近几十年来, 北极变暖是全球和北半球平均温度升高的2倍。即使在最早的全球气候模式模拟中也预测了北极对气候变暖会有这样的放大响应 (例如, Manabe and Wetherald 1975), 到20世纪末开始真正显现 (Serreze et al. 2009; Screen and Simmonds 2010)。观测到的北极放大的主要驱动之一是海冰消失, 无冰水域在春季出现得更早, 使得海洋混合层到夏季吸收和存储更多的太阳能。到秋冬季太阳落下, 这一存储的热量释放到大气中。这一热损失机制帮助解释了为什么北极放大信号有秋季较夏季更强的趋势。

大气传输也是近来极端变暖事件的关键要素。例如, 2016年1月间, 北极范围温度距平为 2.0°C , 超过了之前的 3.0°C 记录 (Overland and Wang 2016; Kim et al. 2017)。该事件引发公众关注。这次事件因热量和湿气从大西洋好太平洋平流进入北极引发, 这一点在2016年1月/2月700 hPa位势高度场轮廓的方向展示出来。向北的温度和湿度平流还造成向下的长波辐射增加, 进一步加热了地表和减少海冰发展 (Cullather et al. 2016; Binder et al. 2017; Rinke et al. 2017)。类似的事件在2017/18年冬季发生 (Overland and Wang 2018)。与近期北极变暖以及温度-反照率反馈相一

致,如图14所示,北极经历了多个冬季(2015—2018年)海冰低值。

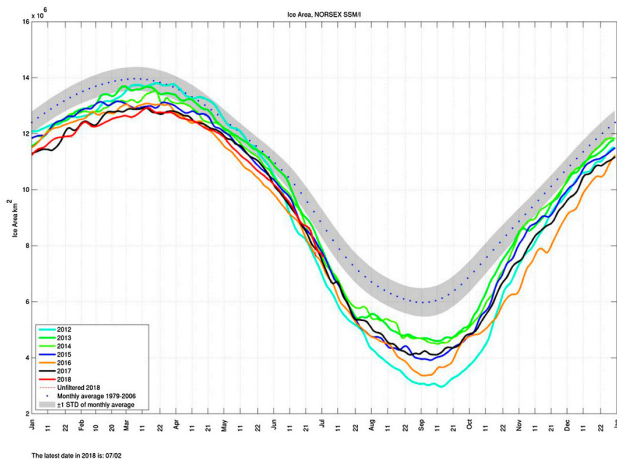


图14 近年来北极海冰面积相对于历史范围(灰色阴影:1979—2006平均值 ± 1 标准偏差)的演变(彩色线条)。近几年(2015—2018)的冬季冰面积是1979年以后最低的

j 极区区域模拟

1) 南极中尺度预报系统

优化南极数值天气预报的需求在1999年出现,那年Jerri Nielsen博士困在Amundsen-Scott南极点站,病情严重。关键问题是,南半球春季温度什么时候足够高允许飞机安全着陆将病人转移出去?没有可信的预报能力提供这样的信息。这之后,南极中尺度预报系统(the Antarctic Mesoscale Prediction System, AMPS)于2000年作为NCAR和俄亥俄大学伯德极地研究中心合作项目,开始为美国南极项目提供优化的预报能力(Powers et al. 2012)。系统的特点是较已有的全球模式有更高的空间分辨率,针对南极环境采用最优物理参数化和区域数据同化。系统目前嵌入网格设置在图15中给出,其中最细分辨率是罗斯岛附近的0.9 km,那里的McMurdo站附近是美国飞机运行中心,而整个南极被8 km网格覆盖。

2) 区域气候模拟

过去20年,两极区域大气模拟投入巨大。第5代宾夕法尼亚州立大学-NCAR中尺度模式(Polar MM5;例如,Cassano et al. 2001)及其后续模式,即极地版WRF模式(极地WRF;例如,Bromwich et al. 2009)被开发出来,在海冰区、大型冰架和冻土等高纬环境具有更好的描述。这些模式应用于广泛的天气和气候问题,如模拟末次冰期Laurentide冰架气候(Bromwich et al. 2004)、通过AMPS开展南极数值天气预报(5j(1)节)、格陵兰附近地面风(如,DuVivier and Cassano 2013)和西南极阿蒙森海湾冰架夏季融化的原因(Deb et al. 2018)。其他主要的

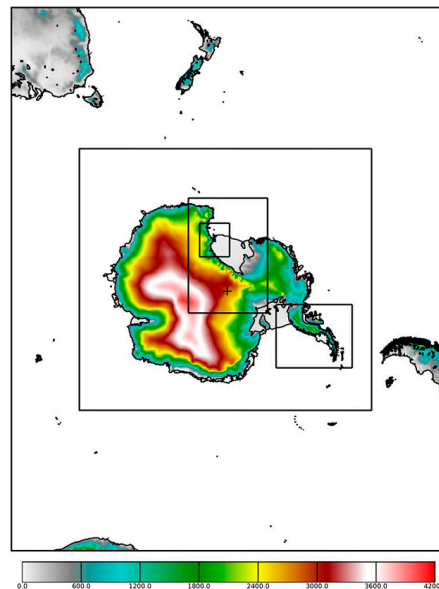


图15 2018年6月AMPS嵌套网格配置。最外层的网格分辨率为24 km,南极洲和相邻的南大洋为8 km,从南极到罗斯海为2.7 km网格,最内部的0.9 km网格关注麦克默多站。2.7 km的网格覆盖了南极半岛

工作包括区域大气气候模式(RACMO;例如Noël et al. 2015)和大气区域模拟(the Modèle Atmosphérique Régional, MAR;例如,Fettweis et al. 2017),并特别关注格陵兰和南极冰架质量平衡及其对海面上升的影响(例如,Vernon et al. 2013)。区域北极系统模式(RASM;Cassano et al. 2017)开始应用于探索北半球高纬地区大气-海洋-陆地耦合问题(例如,DuVivier et al. 2016)。RASM包括了分辨率为几千米的区域海洋模式。

k 极地预报项目和2017—19极地预报年

极地预报项目(the Polar Prediction Project, PPP; <http://www.polarprediction.net/>)是世界气象组织世界天气研究计划的一个10年(2013—2022年)项目(Jung et al. 2016)。PPP的目的是“促进国际合作开发极区(北极和南极)改进从小时到季节时间尺度上的天气和环境预报服务。”该项目的核心内容是极地预报年(the Year of Polar Prediction, YOPP),后者在2017年中期到2019年中期开展。YOPP瞄准改进极地观测系统,促进外场试验项目,在耦合和非耦合模式中实现更好的关键极地过程的表达,分析海冰在各种尺度上的可预报性,评估极区与中纬度之间的联系,开发极区最佳预报验证方法,以及极区天气和冰信息提供者和用户之间的联系。YOPP包含四次加强观测和模拟期,即2018年2—3月北极,2018年7—9月北极,2018年11月中—2019年2月中南极和2020年

2—3月南极,与MOSAIC跨越北冰洋浮标同期(见6节)。YOPP的参与者包括学术界和业务预报中心(包括ECMWF和NCEP),使得YOPP带来的预报改进用于推进两极的区域和全球数值天气预报,变得更为可期。

6 未来十年的优先领域/机遇

从前面的评述中可以清晰地看到,过去100年极地气象取得了巨大进步。极地天气和气候研究得益于技术进步以及快速增加的科学家队伍。最近出现的北极变暖和海冰及雪覆盖消失使得北极成为全球变化的前哨,而南极臭氧洞及其恢复的预测一直让南极是监测和研究的焦点。

在极地气象和气候研究的优先领域中,包括了极地和中纬度天气气候之间的联系。北极变暖和极端天气和气候事件之间的关系已经被提出(Francis and Vavrus 2012; Cohen et al. 2014),但是这种联系的稳定性受到了质疑,机制也不明晰(Barnes and Screen 2015; Screen et al. 2018)。YOPP(5k节)致力于其名称描述的认识和业务预报能力。两个半球极地数据对预报影响的系统评估,有助于更有信心地认识极区对中纬度天气和气候的影响。极区出现的极端事件是另一个出现的研究主题。尽管中纬度极端天气事件的变化已经被记录在案,特别是强降水事件和出现高温的增加,变化中的极区极端事件全面评估还很欠缺。这里最感兴趣的是极端高温事件(图7),它容易导致高影响的雨雪混合事件。其他高影响事件,例如,北极气旋及其动力前兆,对流层顶极地涡旋(例如, Hakim and Canavan 2005; Cavallo and Hakim 2010)的记录不多,天气和气候模式模拟结果也不尽一致。而且,短期海冰变率一直与北极气旋联系在一起(Simmonds and Keay 2009; Simmonds and Rudeva 2012; Zhang et al. 2013; Parkinson and Comiso 2013; Kriegsmann and Brümmer 2014),尽管还不能断定北极气旋活动是否在未来会增加。一方面,更大的夏季高纬度陆地-海洋温度对比有利于气旋频率和/或强度的增加(Day and Hodges 2018);另一方面,极地放大效应将减少总体北-南中纬度斜压性,而该地区是夏季以外月份很多到达北极气旋的源区。

北极地表能量收支——尤其是极地云和辐射——持续挑战天气和气候模式。全球模式地表辐射通量的偏差,大于这些通量与海冰覆盖变化相关的变化。云及其辐射特征无疑是偏差的一部分来源。北冰洋中部从多年海冰覆盖正在向季节海冰覆盖变化,使得模式调整复杂化。将要启动的MOSAIC项目(Shupe et al. 2016)承诺,协调努力改进针对地表能力收支驱动的认识和模拟能力。

最后,还要开展极地气候和天气内部变率作用的评估和预测。如3b节所述,内部变量至少部分导致北极,很可能要加上南极的年代际温度变化。内部变化的量级超过了年代时间尺度外部驱动带来的变化(Hodson et al. 2013);预测与规划者和决策者关心的从年到年代的变化无法摆脱这个问题。这一挑战使预测不仅限于气温这样的大气变量,还延伸到相关系统分量,例如海冰、雪盖和陆地表面变量。

附录

重要外场项目

- a. AIDJEX (1970—1978)
北极海冰动力联合试验(The Arctic Ice Dynamics Joint Experiment, AIDJEX)
- b. SHEBA (1997—1998)
北极地表热量收支(The Surface Heat Budget of the Arctic, SHEBA)
- c. CHAMP (2000年代初)
全领域水文分析和监测项目(The Community-wide Hydrologic Analysis and Monitoring Program, CHAMP)
- d. BOREAS (1990年代—2000年代)
北方生态系统-大气研究(The Boreal Ecosystem-Atmosphere Study, BOREAS)
- e. GEWEX/NEESPI (2000年代)
全球能量和水交换项目(The Global Energy and Water Exchanges Project, GEWEX)
- f. SEARCH (2010年代)
环境北极变化研究(The Study of Environmental Arctic Change, SEARCH)