

南极地区温度和海冰的变化特征 及相互关系

卞林根 陆龙骅 贾朋群

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要 对南极地区温度和海冰的时空变化特征及相互关系进行的初步研究结果表明: 近30余年来南极地区有显著的变暖趋势, 时空差异比较明显。其中以南极半岛地区的变暖趋势最大, 为整个东南极沿岸增温率的2~3倍。近20年来, 整个平均的南极海冰和温度的变化趋势相反, 年际变化的相关关系不显著。经过聚类分析划分出不同的气候区, 能清楚地显示出某些区两者的关系。海冰与同区沿岸温度距平相关信号最强区在南大西洋至西南太平洋海域。

关键词 南极 温度 海冰 时空特征

近年来, 南极地区是否为全球气候变化最敏感的地区, 引起了国内外学者的高度重视。由于南极地区存在特殊的冰雪反馈机制和气候的脆弱性, 温度和冰雪的变化都可能对全球气候和环境产生重要影响。近百年来全球地面气温上升了约 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}^{[1\sim 2]}$, 而北极地区仅增加了 $0.35^{\circ}\text{C}^{[3]}$ 。全球在变暖, 南极地区的气候变化实况如何? Jones^[4]采用包括早期考察在内的南极资料, 分析了南极地区近百年的温度变化趋势, 认为南极地区目前的温度比本世纪的平均值至少升高 1°C 。Jacka等^[5]研究了南大西洋1945~1989年和南极大陆沿岸测站1956~1989年的温度趋势以及温度与海冰的关系, 认为南极温度和海冰变化关系对大气温室气体增加响应的信号比较弱。许多文献中还还对南极海冰面积变化与大气动力和热力场相互关系作了研究。卞林根等^[6]提出, 南极海冰与南半球极涡强度和面积相互作用最敏感区是在东南太平洋至南大西洋海域。Simmonds^[7]将海冰分成四个区, 分析了海冰与南方涛动指数(SOI)的关系, 并提出东南印度洋海冰区与SOI的关系最紧密。本文利用 50°S 以南地区1957~1993年温度记录达到30年(360个月)以上的25个测站资料和1973~1992年逐月南极海冰资料以及用回归分析方法, 对南极地区温度和海冰的时空变化特征及其相互关系进行了分析。

1 资料处理

在过去工作中, 由于不同文献中所用南极地区温度序列的长度和距平序列相对的多年平均不同, 许多结果难以进行直接比较。在对海冰进行分区研究中, 一般是以南极的自然区域或取等范围分区, 各区界线划分有一定的主观性。本文在温度的时空特征分

1996-05-06收到, 1996-10-15收到再改稿

* 本文得到国家南极八五攻关项目(85-905-05)的资助

析中, 采用 IPCC^[2]所用方法, 计算各站年温度相对于 1961~1990 年平均值的距平。为获得南极海冰变化的可靠信息, 本文采用了两种海冰资料, 即海冰北界和海冰面积。1973 年 1 月~1992 年 12 月海冰北界 (Sea Ice Extent) 资料是每 10 个经度范围内的平均北界, 以纬度为单位, 取自澳大利亚南极局^[8]。1973 年 1 月~1990 年 12 月海冰面积 (Sea Ice Area) 资料处理方法见文献^[9], 同样处理成 36 个序列。为尽可能地提取南极地区温度和海冰变化的强信号区, 温度和海冰距平序列经过标准化处理后, 分别进行了聚类分析, 较为客观地划分出温度和海冰相似气候变化区^[10]。聚类分析结果表明, 50°S 以南地区各测站的温度变化在信度为 0.001 时可以分成 5 个不同的气候变化相似区 (图 1a), 即西南极东部区 (1 区)、东南极大陆区 (2 区)、罗斯湾区 (3 区)、南极半岛及其邻近地区 (4 区) 和西南太平洋区 (5 区)。南极海冰在信度 0.05 时也可以分成 5 个区 (图 1b), 即威德尔海及其下游海域为 1 区 (50°W~130°E)、普里兹湾及其上下游海域为 2 区 (30°~110°E)、罗斯湾上游海域为 3 区 (110°~170°E)、罗斯湾及下游海域为 4 区 (170°E~110°W) 和别林斯高晋海及南极半岛两侧海域为 5 区 (110°~50°W)。由图 1 可知, 南极温度和海冰变化分析聚类分成的不同气候区, 除个别区有差异外, 非常相似。

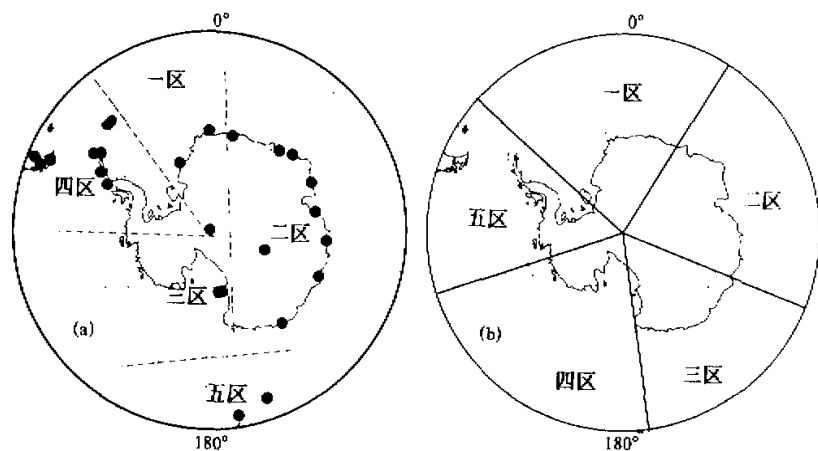


图 1 南极温度 (a) 和海冰 (b) 变化的聚类分区结果

2 温度的变化特征

我们采用各站逐年和各季节温度距平 (相对 1961~1990 年的平均值) 计算了各时段和季节温度的时间倾向率 (表 1)。在 60°S 以南的 20 个测站中仅有莫森 (Mawson)、青年 (Molodeznaje) 和南极点 (Amundsen-Scott) 3 个站呈弱降温趋势 (均未通过信度为 0.05 的检验), 其他站均为变暖趋势, 其中 13 个站的倾向率通过了 0.05 以上的信号度检验。以南极半岛地区的倾向率为最大, 其中罗瑟拉 (Rothera) 和法拉第 (Faraday) 分别为 $0.79^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.67^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。南极大陆沿岸从昭和 (Syowa) 至和平 (Mirny) 站地区的温度变化倾向不明显, 其他测站的倾向率为 $0.2\sim$

$0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。南极内陆地区只有南极点和东方 (Vostok) 站的温度资料达到 30 年, 而且这两个站的温度变化倾向相反。因此目前我们还难以说明南极内陆地区近 30 余年来的温度变化趋势。

从表 1 中 1957~1993 年期间春季 (9~11 月)、夏季 (12~2 月)、秋季 (3~5 月) 和冬季 (6~8 月) 各站的温度倾向率可以看出, 南极大陆沿岸有 7 个站的趋势通过了 0.05 以上信度的检验, 秋季有 8 个站呈降温趋势, 大部分测站夏季和冬季的倾向率大于春季和秋季。

南极半岛地区测站以冬季的倾向率为最大, 达到年倾向率的 1~2 倍, 其中大部分测站的趋势通过了 0.01 的信度。

图 2 给出 1~5 区和 50°S 以南地区平均年温度距平的年际变化曲线和趋势方程。在 1957~1993 年期间, 50°S 以南地区平均增温倾向率为 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (信度达到 0.01), 各区增温倾向率差异较大, 3 区和 4 区即南极半岛地区和罗斯湾区的倾向率均为 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 分别是 1 区的 4 倍多及 2 区和 5 区的 2 倍多。5 个区中 3~5 区的倾向率通过了 0.05 以上的信度检验, 1~2 区未通过 0.05 的信度。显然, 就分区结果而言, 近 30

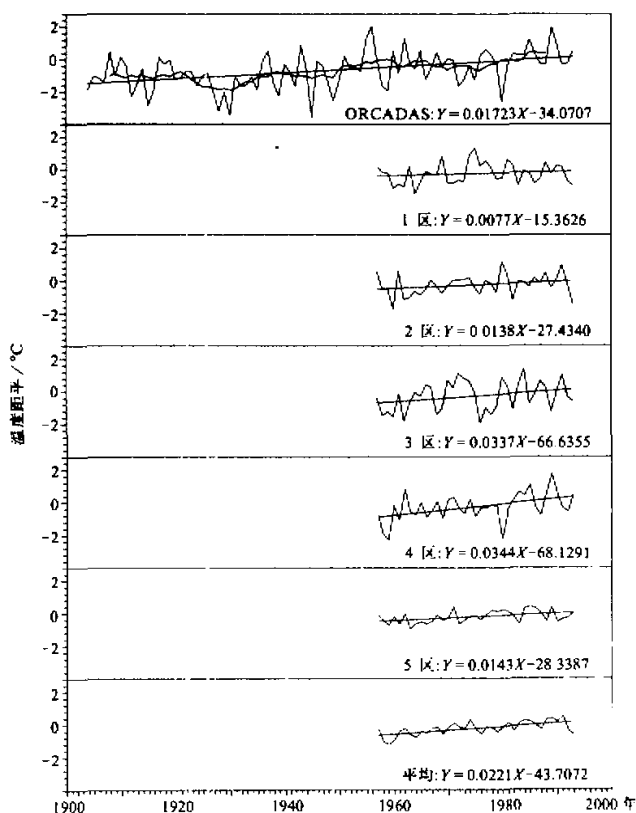


图 2 奥卡达斯 90 年温度距平及 10 年滑动平均和各区 1957~1993 年温度距平的年际变化曲线及倾向率

表 1 各站温度倾向率

10 a

序号	站 名	纬度 °S	经度	海拔	资料 长度	1957~ 1993	1957~ 1972	1973~ 1993	春季	夏季	秋季	冬季
1	Amundsen-Scott	90.0		2800	444	-0.12	0.13	-0.21	0.05	-0.21	-0.05	-0.27
2	Halley Bay	75.5	26.6W	32	444	0.21	0.19	-0.40	0.22	0.32	-0.07	0.37
3	Sanae ST.	70.3	2.4W	52	404	0.34	0.35	-1.06	0.02	0.31	0.12	0.16
4	Novolazarevskaja	70.8	11.8E	99	377	0.38	0.55	0.26	0.24	0.49	0.28	0.34
5	Syowa	69.0	39.6E	21	382	0.09	0.64	0.07	-0.01	0.16	0.07	0.09
6	Molodeznaja	67.7	45.9E	40	367	-0.05	0.10	-0.04	-0.14	-0.09	-0.19	0.22
7	Mawson	67.6	62.9E	16	443	-0.07	-0.01	-0.12	-0.05	0.15	-0.16	0.24
8	Davis	68.6	77.9E	13	390	0.01	0.29	-0.16	0.18	0.31	-0.18	-0.15
9	Mirny	66.6	93.0E	30	442	0.04	0.13	-0.35	0.06	0.10	-0.09	0.16
10	Vostok	78.5	106.9E	3420	415	0.19	0.51	0.19	0.19	0.25	-0.04	0.13
11	Casey	66.5	110.5E	15	442	0.38	0.33	-0.20	0.24	0.30	0.12	0.54
12	Dumont Durville	66.7	140.0E	43	406	0.35	0.48	0.34	0.07	0.32	-0.17	0.45
13	McMurdo Sound	77.8	166.6E	24	415	0.30	0.99	0.21	0.50	-0.09	0.41	0.50
14	Scott Base	77.8	166.7E	16	376	0.44	1.54	0.55	-0.01	0.10	0.89	0.18
15	Rio Gallegos	51.6	69.4W	17	401	0.41	0.32	0.56	0.29	0.47	0.42	0.39
16	Punta Arenas Mag	53.3	70.9W	28	431	-0.03	-0.56	0.26	-0.03	0.15	-0.04	-0.18
17	Ushuaia	54.9	68.4W	30	387	0.24	0.20	0.37	0.24	0.27	0.21	0.13
18	Orcadas	60.7	44.6W	6	403	0.22	0.10	1.04	0.05	0.30	0.22	0.67
19	Signy	60.7	46.5W	7	443	0.21	0.37	0.47	-0.08	0.29	0.18	0.52
20	Bellingshausen	62.2	58.9W	16	439	0.37	0.82	0.39	0.20	0.11	0.17	0.81
21	Esperanza	63.4	57.0W	8	384	0.29	0.27	1.71	-0.10	0.18	0.58	1.07
22	Faraday	65.3	64.3W	9	444	0.67	2.49	0.62	0.31	0.29	0.61	1.49
23	Rothera Point	67.6	68.1W	15	404	0.79	3.01	0.74	0.29	0.42	0.75	1.35
24	Macquarie Is.	54.5	159.0E	6	444	0.16	0.18	-0.01	0.16	0.23	0.14	0.12
25	Campbell Is.	52.5	169.1E	19	432	0.19	0.04	0.23	0.12	0.09	0.13	0.26
平 均						0.22	0.47	0.22	0.12	0.21	0.15	0.36

多年来南极地区增温最显著的地区是南极半岛和罗斯海湾沿岸。东南极大陆的 1 区和 2 区增温倾向率分别为 $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.14^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。通过对 Jones 的全球平均温度资料的计算和分析发现，1957~1972 年全球温度变化倾向不明显（约 $-0.1^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，未通过 0.05 的信度检验），南极地区则为显著的升温阶段（平均倾向率为 $0.47^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，信度达到 0.01），1973~1992 年南极大陆有些测站呈降温趋势（表 1），平均变化趋势与全球升温的幅度基本相当（倾向率约为 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ）。由此说明近 20 年来南极地区的变暖趋势有所下降，此结果难以用温室气体的作用来解释南极与全球气候变化的差异。

在 60°S 以南地区，仅有奥卡达斯（Orcadas）站的温度资料达到 90 年（1904~1993 年）。为说明该站温度变化在南极地区的代表性，我们计算了该站 1957~1993 年温度距平与各站同期温度距平的相关系数。从图 3 可知，该站温度变化与南极半岛上的 4 个测站和与其邻近的西格尼（Signy）站呈显著的正相关（信度达到 0.01），而与南极大陆上的各站为不显著的负相关。图 3 中还给出了南极点（点线）和东方站（虚线）与各站的相关系数，两个内陆站与南极大陆沿岸站呈正相关，大部分相关系数通过了 0.05 以上信度检验，而与南极半岛地区和南太平洋测站呈负相关，且不显著。此结果

表明奥卡达斯站的温度变化可以代表南极半岛地区的温度变化,而不能代表南极大陆。该站近百年来温度倾向率为 1.7°C (图 2), 明显高于全球平均 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 的增温速率, 这是值得注意的一个事实。因此分析南极大陆近百年来温度变化, 需要寻找代用资料, 如从冰芯或其他途径获取。

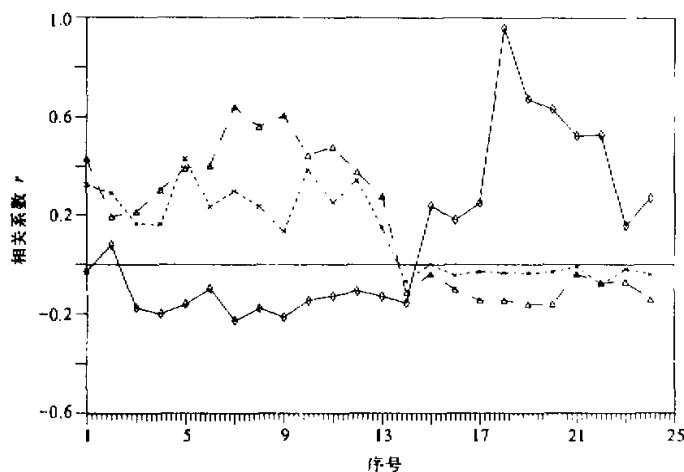


图 3 奥卡达斯(实线)、南极点(点线)和东方站(虚线)1957~1993 年温度距平与各站年温度距平的相关系数 (r), 横坐标中的序号与表 1 相同

3 海冰的变化特征

南极海冰具有季节和年际变化大的特点, 是全球地-气系统中特别敏感的因子之一。目前可用于研究的各种海冰序列均始于 1973 年 1 月。本文利用近 20 年的海冰北界和海冰面积两种资料来讨论近 20 年来海冰变化特征。

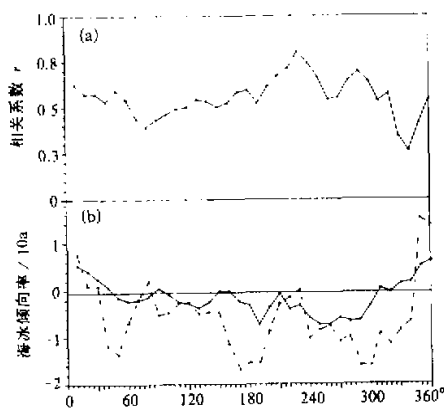


图 4 海冰北界和海冰面积的相关系数 (a) 及两者倾向率 (b) 的经向分布
海冰北界为虚线, 海冰面积为实线

图 4a 给出了 36 个海冰北界距平序列和面积距平序列同期和同范围的相关系数, 图中所有相关系数均通过了 0.01 的信度检验。图 4b 显示了海冰北界和面积距平序列 20 年来随时间变化的倾向率的经向分布。海冰面积距平 36 个序列中有 12 个序列为正倾向率, 海冰北界距平 36 个序列中有 7 个序列为正倾向率, 正倾向率几乎都出现在威德尔下游海区。其余大部分序列为负倾向率, 即海冰呈减少趋

势。海冰面积和海冰北界的倾向率分别有 67% 和 81% 的序列通过了 0.05 的信度检验。由此可以认为南极海冰北界和海冰面积的变化规律基本相似。当然, 南极海冰资料的获取具有较为复杂的过程^[1], 有些差异是必然的, 也是目前技术上难以克服的问题。

为分析南极海冰的短期气候变化规律, 我们计算了各区海冰北界逐年距平和。如图 5a 所示, 各区海冰距平和的年际振幅均大于整个南极平均距平和的年际振幅。其中以 1 区和 4 区距平和振幅最大, 各区之间的重冰年和轻冰年出现的时段和持续时间均有较大差异, 如 1 区与 2 区和 3 区年际变化呈相反趋势。

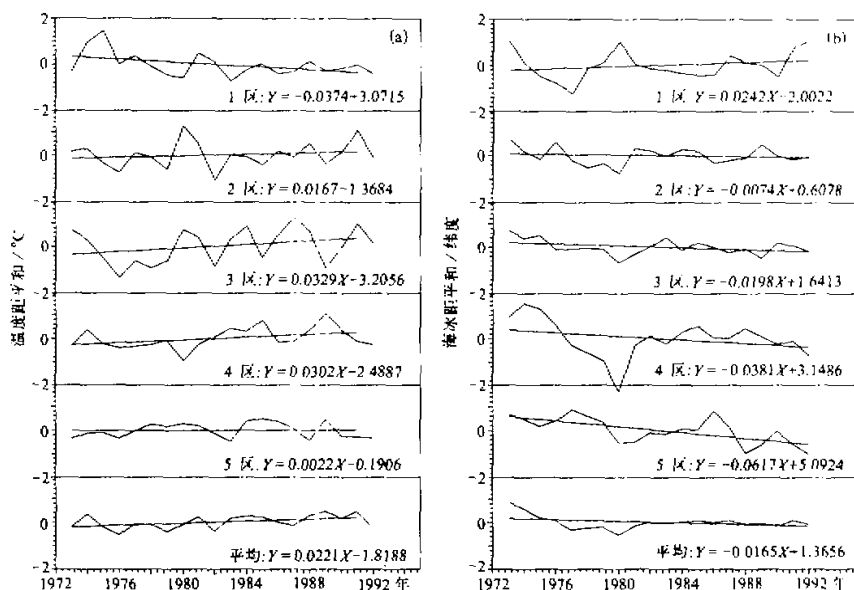


图 5 1973~1992 年南极各区海冰 (a) 和各区温度 (b) 距平和的年际变化曲线及倾向

1973~1992 年各区海冰距平和的倾向率, 除 1 区通过 0.05 信度检验和 2 区倾向不显著外, 其余各区均通过了 0.01 的信度检验。整个南极海冰面积呈减少趋势, 倾向率为 -0.17 个纬度 / 10 a, 与 Jacka 等^[5]给出的 1973~1989 年倾向 (-0.19 纬度 / 10 a) 基本一致。1 区海冰倾向率与其他区相反, 为 0.24 个纬度 / 10 a, 即海冰面积呈扩张趋势, 2~5 区海冰均呈减少趋势, 以 5 区即南极半岛两侧地区倾向最大, 达到 -0.62 个纬度 / 10 a, 2 区即普里兹湾上下游海域倾向率最小, 仅为 -0.07 个纬度 / 10 a。由此可见, 南极海冰虽然总体上呈减少趋势, 但时空差异较大, 海冰减少最明显的区域是在东南太平洋至南极半岛两侧海域。整个南印度洋至西南太平洋海域海冰减少的趋势不十分明显。

4 温度和海冰变化的相互关系

为了分析近 20 年来南极海冰与温度变化的关系, 我们计算了各区与海冰同期的温

度距平和的倾向率(图 5b)。比较图 5 中温度和海冰距平的变化趋势可以发现,1973~1992 年各区温度和海冰变化倾向存在一定关系。1 区温度近 20 年来呈变冷趋势($-0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),与此几乎对应的 1 区海冰呈增加趋势。其余各区的温度、海冰随时间均呈相反趋势变化。值得提出的是,2 区温度的倾向率比其他区明显偏小,而对应的 2 区和 3 区海冰都是减少最小的海区,4 区温度倾向率比较大,对应的 5 区海冰为减少最明显的区域。此结果表明,南极地区海冰和温度时间变化趋势的关系明显,即温度呈上升趋势,海冰呈减少趋势,反之则相反。特别是东南太平洋至南极半岛两侧海域($170^{\circ}\text{E}\sim 50^{\circ}\text{W}$)两者的趋势关系最明显。Budd 等^[12]和贾朋群等^[13]已对海冰变化对全球气候的反馈机制进行了讨论。

表 2 各区海冰北界和面积距平与同区沿岸温度距平的相关系数 (r)

	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区	平均
海冰北界	<u>-0.28</u>	<u>-0.21</u>	<u>-0.42</u>	-0.02	-0.09	0.01
海冰面积	<u>-0.32</u>	<u>-0.31</u>	<u>-0.45</u>	0.12	<u>-0.20</u>	0.03

注:下划线表示相关系数通过 0.05 的信度检验

表 2 给出了海冰北界和面积距平与同区沿岸温度距平的相关系数。为滤去季内小扰动,对月序列进行了三个月的滑动平均。样本长度为 238;信度为 0.05 时的临界相关系数(r)为 0.13,信度为 0.01 时,临界相关系数为 0.17。从总体来看,平均南极海冰距平与南极沿岸地区温度距平的相关不显著,各区海冰与温度变化相关的强信号区为 1~3 区,相关系数均通过 0.01 的信度检验。3 区海冰与 3 区沿岸温度距平的相关系数最大(-0.42)。由此可见,从南大西洋至西南太平洋海域的海冰与温度变化的关系十分紧密,都呈负相关关系。从表 2 中还可以看出,海冰面积距平与温度距平的相互关系要比海冰北界距平与温度距平的关系更紧密些。

为了更直观地表示南极地区温度与海冰的相互关系,我们绘制了某些区海冰距平与同区沿岸温度距平经 12 个月滑动后的年际变化曲线。由图 6 可以清楚地看出,温度与海冰北界和面积的负相关关系,尤其在低温期和高温期与对应的重冰期和轻冰期反映得十分显著。

5 结语

综上所述,南极地区温度和海冰的气候特征及相互关系有明显的时空特征,如 IPCC 报告所指出,全球在增温,但各地不均匀,具有明显的季节性和区域性特点。南极地区的气候变化也是如此。因此,在分析海冰与温度相互关系的时空特征时应考虑不同地区和不同时间段的敏感性。本文获得的主要结果有:

(1) 近 30 余年来,50°S 以南地区增温的平均倾向率为 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,南极半岛和罗斯海沿岸地区的变暖倾向率最大,是东南极大陆沿岸地区增温率的 3 倍之多。除 1 区外,其余各区均大于同期的全球平均倾向率($0.08^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)。1957~1972 年是南极地区升温最大的时段,同期全球温度变化趋势不明显;1973~1992 年南极地区与全球平

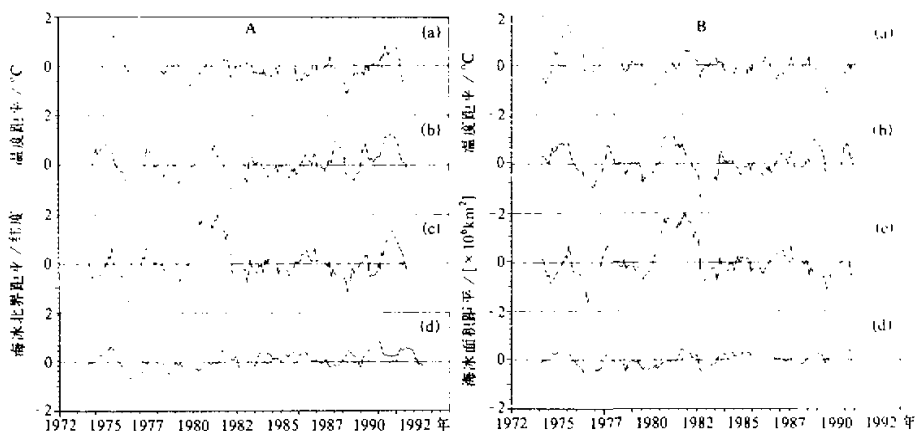


图6 海冰北界(A)和海冰面积(B)距平与沿岸温度距平的年际变化曲线

(a) 1区温度与海冰, (b) 2区温度与海冰, (c) 3区温度与海冰, (d) 平均温度与平均海冰
实线为温度距平, 虚线为海冰距平

均的升温幅度基本相同。此结果难以用温室气体的作用来解释南极与全球气候变化的差异。

(2) 奥卡达斯站近百年来的温度变化表明, 可以代表南极半岛地区的温度变化, 不能代表南极大陆上的温度变化。该站百年温度变化倾向率为 1.7°C , 明显高于全球 $0.3 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 的增温率, 南极半岛可能是全球升温较高的地区之一。

(3) 近 20 年中, 海冰北界和海冰面积变化特征基本相同, 表明海冰资料有较高的可靠性。整个南极海冰面积呈减少趋势, 倾向率为 0.17 个纬度 / 10 a , 其中威德尔海及其下游区海冰呈扩张趋势, 罗斯海域至南极半岛周围海域, 即南太平洋海区海冰面积减少显著。

(4) 海冰与沿岸温度距平的相关分析表明, 整个南极平均的海冰与温度变化的相关不显著。经过聚类分析划分出的气候区, 则能够清楚地显示出除罗斯海域外, 海冰与同区沿岸温度变化呈较显著的负相关关系, 相关信号最强区在南大西洋至西南太平洋海域。

由于南极地区测站覆盖范围和资料长度的限制, 有关温度和海冰变化的关系及其机理需作深入研究。

致谢: 承蒙 Jones, P. D. 博士 (英国东安及利亚大学) 和 Jacka, T. H. 博士 (澳大利亚南极局) 提供温度和海冰资料, 周秀骥院士对本文提出了宝贵意见, 谨此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 1 IPCC, 1992, *Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Houghton, J. T., Callander, B. A. and Varney, S. K. (eds), Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 1~198.

- 2 IPCC, 1996, *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*, Houghton, J. T., Meire Filho, L. G. and Callander, B. A. (eds), Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 1~572.
- 3 Kelly, P. M., P. D. Jones, C. B. Sear, B. S. G. Cherry and R. R. Tavakol, 1982, Variation in surface air temperature. Part I: Arctic regions, 1981~1980, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 71~83.
- 4 Jones, P. D., 1990, Antarctic temperatures over the present century—a study of the early expedition record, *J. Climate*, **3**(11), 1194~1202.
- 5 Jacka, T. H. and W. F. Budd, 1992, Detection of temperature and sea ice extent changes in the Antarctic and southern ocean, *Proceedings of international conference on the role of polar regions in global change*, University of Alaska Fairbanks, Vol. 1, 63~68.
- 6 卞林根、陆龙骅、贾朋群, 1996, 南极海冰和南半球极涡的时空特征及其相互关系, *地理学报*, **51**(1), 33~42.
- 7 Simmonds, I., 1995, Relationships between the interannual variability of Antarctic sea ice and the southern oscillation, *J. Climate*, **8**(3), 637~646.
- 8 Jacka, T. H., 1983, Computer data base for Antarctic sea ice extent, ANARE Research Notes, 13, Australian Antarctic Division, 1~10.
- 9 Walsh, J. E. and C. M. Johnson, 1978, Analysis of Arctic sea ice fluctuation 1953~1977, *J. Physical Oceanography*, **9**(3), 580~591.
- 10 陆龙骅、卞林根、贾朋群, 1996, 近30年来南极和邻近地区温度的时空变化特征, 周秀骥、陆龙骅主编, 南极与全球气候环境相互作用和影响的研究, 北京: 气象出版社, 6~12.
- 11 Parkinson C. L., 1992, Southern ocean sea ice distributions and extents, *Phil. Tran. K. Soc. Lond B*, **338**, 243~250.
- 12 Budd, W. F., 1991, Antarctica and global change, *Climate Change*, **18**, 271~299.
- 13 贾朋群、卞林根、陆龙骅, 1992, 南极海冰问题评述: 观测, 南极研究, **4**(1), 51~58.

Characteristics of Antarctic Surface Air Temperature and Sea Ice Variations and Their Relationship

Bian Lingren, Lu Longhua and Jia Pengqun

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract Temporal-spatial characteristics of Antarctic surface air temperature and sea ice variations have been statistically analyzed. Results show that, during the last 30 years there was an obvious warming trend in Antarctica, but there exists substantial difference in different sectors and different periods. The most significant warming trend occurred in the Antarctic Peninsula, about 2~3 times greater than that in the whole east Antarctica. In recent 20 years the correlations between Antarctic mean temperature and mean sea ice area are low and insignificant, but their linear trends are found to be opposite related in each sector, that is, sea ice extent is reduced when temperature is high. The different climate sectors defined by cluster analysis clearly show a close relationship between the two parameters on the inter-seasonal time scale. The most sensitive correlation sectors found are from the southern Atlantic to Southwest Pacific ocean.

Key words Antarctica temperature sea ice temporal-spatial characteristic