

# 跨南大洋经向断面的大气垂直剖面特征研究

高立宝<sup>1,2,3,4</sup>, 郭桂军<sup>2,3</sup>, 史久新<sup>1</sup>, 薛亮<sup>2,3</sup>, 曲大鹏<sup>2,4</sup>, 宋新新<sup>5</sup>, 祖永灿<sup>2,3</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100;

2. 自然资源部第一海洋研究所 海洋与气候研究中心, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;

4. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

5. 江苏海洋大学 海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222005)

**摘要:** 基于中国第 29 次南极科学考察期间获取的 GPS 探空观测数据, 分析了东南印度洋和西南太平洋经向断面大气垂直结构的基本特征、季节变化和纬向差异。不同断面的大气垂直结构差异显著, 但也具有共同特征, 4 000 m 以下低空的气温和湿度明显高于高空, 而低空风速明显小于高空风速, 8 000 m 以上高空各个观测要素的垂直变化较小, 整个断面主要以西风为主, 整个垂直剖面湿度异常偏高(偏低)的区域通常对应上升(下沉)气流。给出了 3 个观测断面的大气锋面位置和类型, P1 断面的大气锋面在 47°~50°S, P2 和 P3 断面的大气锋面在 52°~58°S, P1 和 P2 的锋面属于暖锋, P3 的锋面由于气旋的影响分类不明显。东南印度洋大气剖面结构具有明显的季节变化, 秋季和春季相比, 秋季具有风速小, 气温高特征, 大气锋面更加偏南。东南印度洋和西南太平洋断面的大气剖面结构差异明显, 二者相比, 东南印度洋具有风速大、气温高及相对湿度小的特征, 但大气锋面位置相同。

**关键词:** 南大洋; 探空观测; 大气垂直剖面; 大气锋面; 季节变化

中图分类号: P741<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2021)02-0255-13

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.02.009

**引用格式:** GAO L B, GUO G J, SHI J X, et al. Characteristic of the atmospheric vertical profiles across the meridional section over the Southern Ocean[J]. *Advances in Marine Science*, 2021, 39(2): 255-267. 高立宝, 郭桂军, 史久新, 等. 跨南大洋经向断面的大气垂直剖面特征研究[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(2): 255-267.

南大洋是全球海洋中十分重要的一个洋区, 其面积约占世界大洋总面积 20%, 它连接了大西洋、印度洋和太平洋的南部扇区, 拥有唯一环绕地球一周的海洋环流系统——南极绕极流, 为各个大洋之间的水交换、热量交换和盐量交换做出了重要贡献, 对全球变化的进程有指示作用<sup>[1-3]</sup>。南大洋又通过大气和海洋环流的经向传输与低纬度地区紧密联系起来, 在地球系统的能量交换、碳收支及环境和气候的演变中扮演着重要的角色<sup>[4-6]</sup>。

海洋锋面是温度、盐度等性质不同两种水团的交界面, 锋面处水团性质有很强的水平梯度, 而南大洋正是海洋锋面的富集区。海表面高度和海表面盐度的梯度很好地揭示出南极绕极流是由很多急流或锋面组成的<sup>[7]</sup>。南大洋主要包括 3 个锋面和 3 个区, 从北到南分别是: 亚南极区(Subantarctic Zone, SAZ)、亚南极锋(Subantarctic Front, SAF)、极地锋区(Polar Front Zone, PFZ)、极地锋(Polar Front, PF)、南极区(Antarctic Zone, AZ)、南 ACC 锋(Southern Antarctic Circumpolar Current Front, SACCF)<sup>[8-10]</sup>。类似的, 大气锋面是冷暖气团交界面形成的狭窄过渡区, 锋面处气团性质也有很强的水平梯度, 大气锋面又根据冷气团和暖气团的移动方向分为冷锋、暖锋、准静止锋和锢囚锋。由于低温和强劲西风带的存在, 南大洋海洋锋

收稿日期: 2019-11-25

资助项目: 国家自然科学基金项目——普里兹湾高密度陆架水对南极底层水形成的贡献(41876231); 束星北青年学者项目——南极重点海域的关键海洋动力过程研究(2018S02); 南大洋调查专项——南极重点海域对气候变化的响应和影响(IRASCC01-01-01A, 02-01-01, 02-01-04); 国家重点研发计划项目——南大洋关键海洋动力过程的观测研究(2018YFA0605701, 2019YFC1509102)

作者简介: 高立宝(1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事极地海洋动力学方面研究。E-mail: gaolb@fio.org.cn

(李燕 编辑)

面附近存在独特的海气相互作用机制,大气主要通过影响海-气界面热通量以及 Ekman 作用对海洋产生单向影响<sup>[11-12]</sup>,最新研究表明,南大洋风应力旋度的增强可以将热量从海气界面存储到海洋内部,从而减缓全球表层温度增暖的速度<sup>[13]</sup>。

南半球环状模是南大洋的主要控制变率,指示着西风带以及中-高纬度之间的大气环流变异<sup>[14-17]</sup>。关于南半球环状模和南大洋大气环流结构的研究主要是基于再分析数据、卫星数据和数值模式开展的<sup>[14-21]</sup>,而南大洋大气垂直剖面的现场观测却非常稀少,通过船载方式进行探空系统观测是获得南大洋大气垂向结构的主要手段之一,但强劲西风带造成的恶劣海洋环境,使得现场观测变得异常艰难,在一定程度上制约了对南大洋大气垂向结构的深入了解<sup>[22-23]</sup>。Pezzi 等在东南印度洋获得了 6 组探空观测剖面数据,由于只有风速和气温参数而且观测数量太少,只对该断面低空大气的垂向分布结构进行了初步分析<sup>[23]</sup>。本文利用中国第 29 次南极科学考察期间 3 次跨越南大洋经向断面获取的多参数 GPS 探空数据,对东南印度洋和西南太平洋断面大气垂直剖面特征进行了分析,为今后深入分析南大洋锋面处的海-气相互作用提供参考。

## 1 数据介绍

### 1.1 航次介绍

我国南极海洋科学在过去的 30 多年期间,经历了从无到有、逐步发展的过程,“南北极环境综合考察与评估”专项实施之前,我国在南极周边重点海域的海洋调查远落后于发达海洋国家,拥有的海洋基础资料时空密度小、准确度低、覆盖率低、重复性差,并且主要集中在普里兹湾内的几个不规则断面上,不仅难以反映普里兹湾当前的海洋状况,在威德尔海、罗斯海仍然几乎是空白的,远不能满足“南北极环境综合考察及资源潜力评估”战略部署的需求。

2012 年开始的极地考察专项是我国首次大规模的综合极地科学考察研究专项,科学考察的学科内容、观测区域、观测手段及考察队伍规模均达到了前所未有的高度,取得了历史性的进展,开展了以南大洋、普里兹湾为重点的第 29 次南极海洋科学考察,尤其重要的是我国南极海洋科学考察已经成为一项业务化的考察工作,凸显了我国对极地工作的重视程度已经迈入新的里程碑。尽管我国的极地海洋科学在过去 30 多年间取得了一系列历史性的进展,但是与国外先进水平相比仍存在一定的差距,但随着国家对极地事业的重视,我国的极地考察事业正在逐步改善。

中国第 29 次南极考察是“南北极环境综合考察与评估”专项的第一个正式航次(2012-10-28—2013-04-10),重点观测海域为普里兹湾及其邻近海域。该航次在保留我国原有南极科学考察工作的基础上,拓展了南极科考范围,新增了大量的作业内容,通过多种手段对普里兹湾及其邻近海域开展了物理海洋与海洋气象综合考察,系统掌握目标区域的海洋水文、海洋气象、海冰等环境基本信息,获取海洋环境变化和海-冰-气系统变化过程的关键要素信息,为我国和全球气候变化、资源开发利用、航海与后勤保障提供基础资料。本文采用该航次期间往返穿越南大洋西风带获得的 GPS 探空观测数据。

### 1.2 GPS 探空观测系统

观测使用的探空系统是专门的探测大气垂直剖面的气象仪器,测量要素包括气温、湿度、风速、风向。测量系统主要包括两部分:一个是 GPS-1 型接收机,用于接收各要素的实时观测数据;另一个是 GPS-TK 探空仪,随探空气球一起上升的传感器集成部分。

测量过程中,先连接 GPS-1 型接收机与电脑,并固定于室外开阔区域以便接收探空仪发回的各种气象参数。室外释放挂有探空仪的探空气球,接收测量数据。随着气球逐渐升高,气压逐渐降低,最后气球自爆,观测结束,探空仪自然坠落不可回收。经过多次南北极考察的现场实验检验,该系统接收信号稳定性良好。该探空系统的温度精度为 0.2 °C,湿度精度为 2%,风速测量精度为 0.2 m/s,风向测量精度为 2°,风速、风向

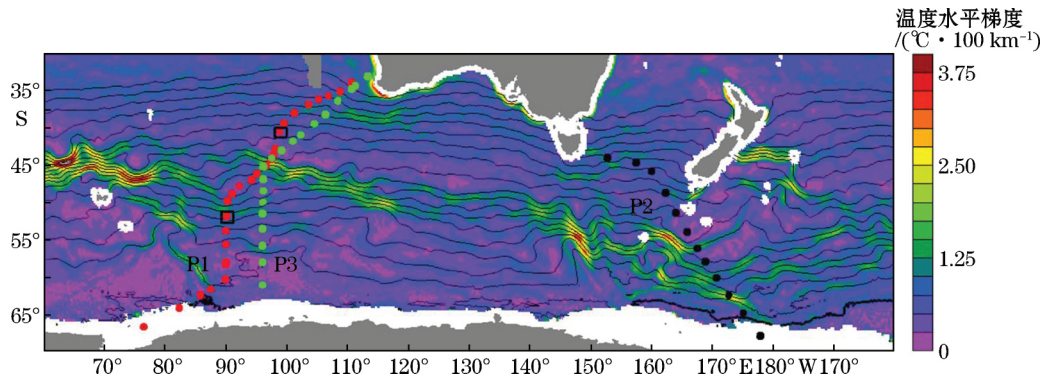
和气压由 GPS 数据计算得出,风向  $0^{\circ}$  表示北风,风向  $90^{\circ}$  表示东风。气温传感器的测量范围为  $-60\sim 40^{\circ}\text{C}$ , 满足高空低温环境的观测需求。GPS-TK 探空仪的具体技术指标见表 1。

表 1 GPS-TK 探空仪技术指标  
Table 1 Parameters of GPS-TK

参 数	测量范围	分辨率	精 度
气温/ $^{\circ}\text{C}$	$-60\sim 40$	0.1	$\pm 0.2$
湿度/ $\%$	$0\sim 100$	0.1	$\pm 2$
风向/ $^{\circ}$	$0\sim 360$	0.5	2
风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$0.2\sim 60.0$	0.1	0.2

### 1.3 观测站位分布

中国第 29 次南极考察执行期间,在往返南大洋的过程中进行了 3 次探空气球断面观测,共计获得有效探空气球观测 57 个,其中 2 条断面位于东南印度洋,1 条位于西南太平洋。断面按时间顺序编号为 P1, P2 和 P3,图 1 给出了 3 条断面上探空观测的具体站位分布。2012-11-20—2012-11-29 进行了澳大利亚弗里曼特尔至中山站的断面观测,完成 26 个 GPS 探空观测,即 P1 断面;2013-01-07—2013-01-15 进行了罗斯海至澳大利亚霍巴特之间的断面观测,完成 12 个 GPS 探空观测,即 P2 断面。2013-03-13—2013-03-19 进行了中山站至澳大利亚弗里曼特尔之间的断面观测,完成 19 个 GPS 探空观测,即 P3 断面。每隔 6 h 进行一次探空观测,分别按照 00:00,06:00,12:00 和 18:00 依次开展,在海洋锋面集中海域适当加密观测。其中的海表面温度资料是自 1997 年以来高精度 ( $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ) 的数据,来源于热带降水测量任务 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 的微波遥感卫星<sup>[24]</sup>,在此主要用来表征南大洋主要海洋锋面的具体位置。



注:P1(●)观测时间为 2012-11-20—2012-11-29,P2(●)观测时间为 2013-01-07—2013-01-15,

P3(●)观测时间为 2013-03-13—2013-03-19

图 1 南大洋探空观测的站位分布

Fig.1 Air sounding stations in the Southern Ocean

## 2 观测结果

### 2.1 大气剖面的垂直结构

本文用到的探空数据较好的反映了南大洋大气剖面的垂直结构。探空观测高度在  $4\ 000\sim 15\ 000\text{ m}$  不等,但均观测到了对流层的温度、湿度、风速、风向剖面的垂直变化,超过  $10\ 000\text{ m}$  高度的还观测到了对流层

顶的逆温层垂直结构,对分析南大洋的大气锋面及环流结构有一定的帮助。图2展示了P1断面上两个典型的垂直剖面观测数据(位置如图1黑框所示),可以清楚地看出,随着高度的增加,气压呈指数衰减,超过10 000 m时气压减小到300 hPa以内;气温随着高度的增加线性降低,大约每升高100 m气温下降 $1^{\circ}\text{C}$ ,在9 000 m左右气温降到最低(低于 $-50^{\circ}\text{C}$ ),之后气温又逐渐升高,该转折的高度近似可以看做是对流层和平流层的分界;整个垂直剖面以西风为主导,风速为 $5\sim 30\text{ m/s}$ ,高空风速比低空风速要大很多。湿度剖面的波动范围较大,但到了9 000 m以上的高空,湿度迅速减小,主要与高空大气稀薄和低温密切相关。跨南大洋经向断面的观测很好反映了大气剖面垂直结构的南北差异,将在接下来的断面特征和季节变化分析中予以展示。

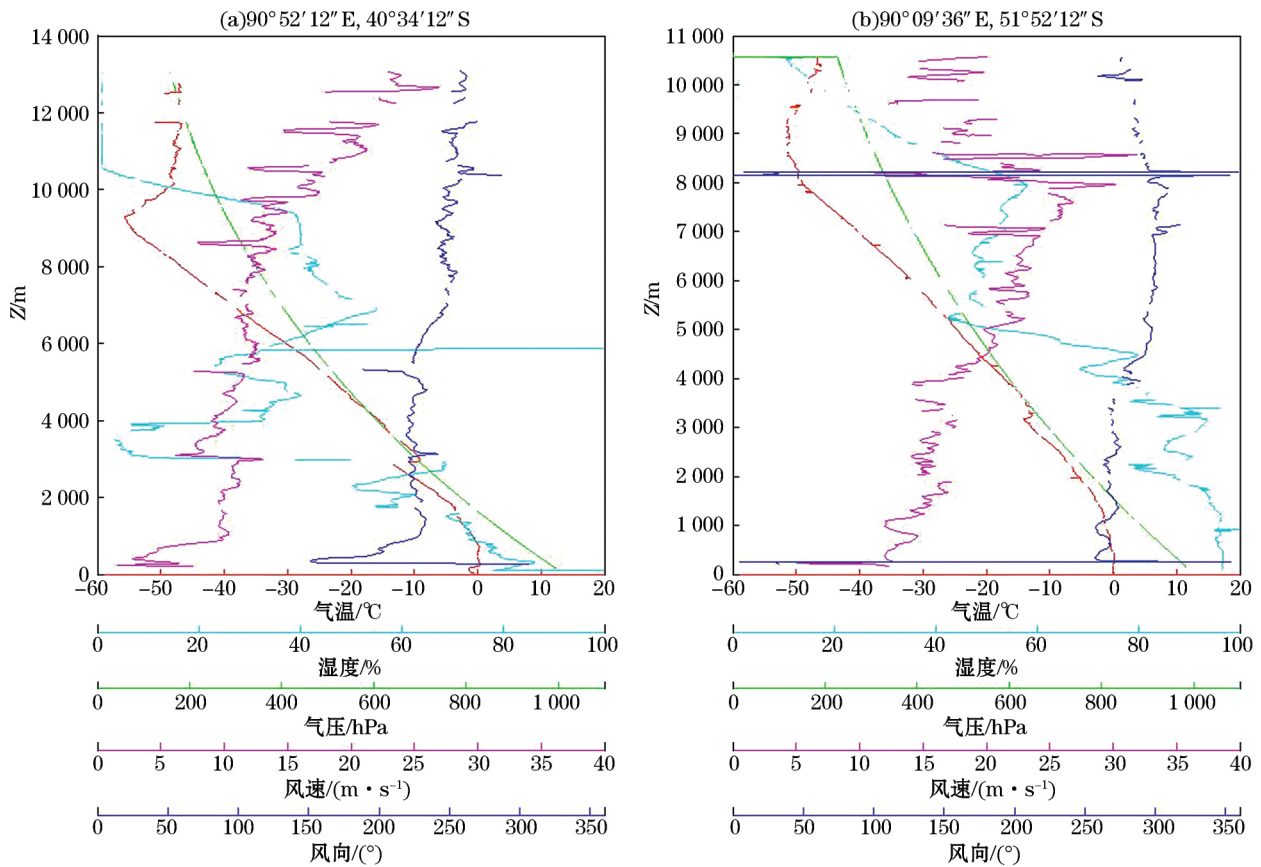


图2 南大洋 GPS 探空测得的典型剖面

Fig.2 Typical air sounding profiles in the Southern Ocean

## 2.2 大气锋面的分类和识别

大气锋面是冷暖气团交界面形成的狭窄过渡区,也叫锋区,锋面两侧的温度、湿度、气压、风等要素都有明显的差异,所以在锋面附近常伴有云、雨、大风等天气。大气锋面根据冷气团和暖气团的移动方向分为冷锋、暖锋、准静止锋和锢囚锋。本文以气温的空间梯度为主要识别要素确定锋面的位置,并结合经向风的分布分辨锋面的基本类型。

通常的锋面识别主要是针对近地面的低空大气而言,因此这里给出了2 000 m以下平均的大气温度(图3a)和经向风(图3b)在3个观测断面的分布。P1断面气温经向梯度最大的位置在 $47\sim 50^{\circ}\text{S}$ ,气温从 $-4^{\circ}\text{C}$ 快速上升至 $1^{\circ}\text{C}$ ,该位置的经向风为 $2\sim 8\text{ m/s}$ 的北风,因此符合暖锋特征,在 $43\sim 45^{\circ}\text{S}$ 也存在气温快速变化,但主要是1 000 m以上的气温变化所致;P2断面气温经向梯度最大的位置在 $52\sim 58^{\circ}\text{S}$ ,气温从 $-1^{\circ}\text{C}$ 快

速上升至  $5^{\circ}\text{C}$ , 该位置的经向风为  $4\sim 6\text{ m/s}$  的北风, 符合暖锋特征; P3 断面气温经向梯度最大的位置与 P2 相同, 但温度梯度更大, 气温变化范围在  $-9\sim 8^{\circ}\text{C}$ , 经向风在  $55^{\circ}\text{S}$  附近存在南风 and 北风的转化, 主要是因为  $55^{\circ}\text{S}$  以北的气旋式环流所致, 之后的断面特征分析将进一步介绍。通过以上分析, 给出了观测断面低空大气的锋面位置和基本分类(表 2)。

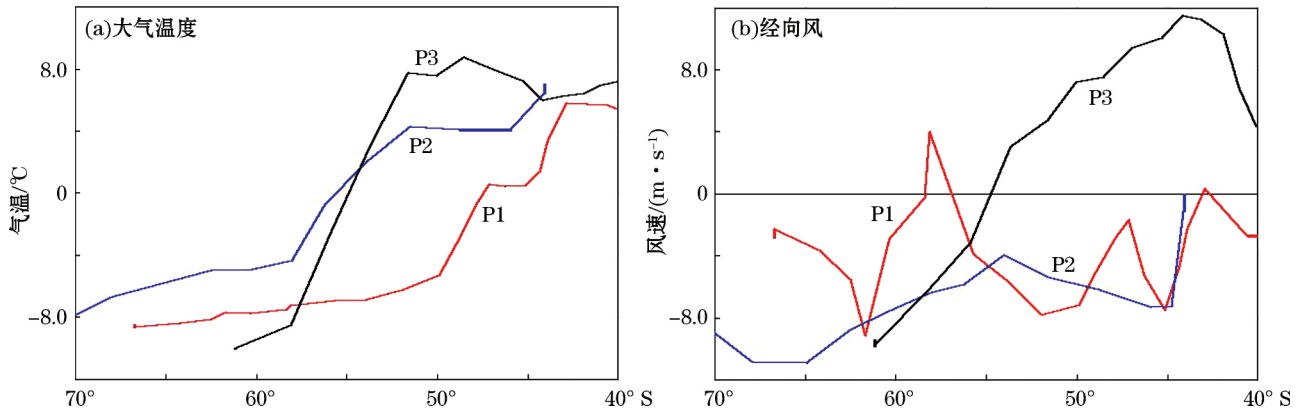


图 3  $0\sim 2000\text{ m}$  平均的大气温度和经向风

Fig.3 Mean air temperature and meridional wind below 2000 m

表 2 观测断面的大气锋面位置

Table 2 Locations of atmospheric fronts in the observational sections

断面	锋面位置	锋面类型	时间
P1	$47^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{S}$	暖锋	2012 年 11 月(春末)
P2	$52^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$	暖锋	2013 年 1 月(夏季)
P3	$52^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$	分类不明显, 气旋所致	2013 年 3 月(初秋)

### 2.3 跨南大洋经向断面的特征分析

下面基于中国第 29 次南极考察在南大洋获得的 3 条断面的探空观测, 分析跨南大洋经向大气断面的基本特征。第 29 航次第一次穿越西风带期间, 从澳大利亚弗里曼特尔前往中山站途中进行了南大洋 P1 断面的探空观测。P1 断面覆盖区域海洋表层的温度梯度显示, 该断面的海洋锋面主要位于  $45^{\circ}\sim 56^{\circ}\text{S}$ (图 1), 从 P1 断面探空观测要素垂直剖面(图 4)的经向梯度可以看出, 该断面的低空大气锋面主要位于  $47^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{S}$  附近,  $44^{\circ}\text{S}$  附近的  $1000\sim 3000\text{ m}$  高度存在气温快速变化(图 4b 和图 3a), 主要是  $44^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{S}$  区域的强劲西风从高空一直延伸到近地面, 造成了该区域与外部区域的湿度和温度的显著差异。  $50^{\circ}\text{S}$  以北的亚南极区, 风向介于  $240^{\circ}\sim 280^{\circ}$ , 以西风为主, 高空与低空风速差异明显,  $4000\text{ m}$  以下低空风速在  $0\sim 20\text{ m/s}$ ,  $4000\text{ m}$  以上高空风速在  $40\text{ m/s}$  以上, 风速的垂直切变使得高低空气温分布也有类似的结构,  $4000\text{ m}$  以下气温在  $-5\sim 15^{\circ}\text{C}$ ,  $4000\text{ m}$  以上气温在  $-30^{\circ}\text{C}$  以下, 最低达到  $-60^{\circ}\text{C}$ , 该区域垂直剖面的相对湿度较大, 整个剖面的相对湿度大于  $50\%$ , 明显呈现较强的垂直对流结构。  $50^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$  区域的风向介于  $180^{\circ}\sim 240^{\circ}$ , 以西南风为主, 是该断面的西风主轴区, 高空与低空风速差异更加明显,  $4000\text{ m}$  以下低空风速在  $0\sim 20\text{ m/s}$ ,  $4000\text{ m}$  以上高空为强劲的西南风, 平均风速在  $40\text{ m/s}$  以上, 最高超过  $75\text{ m/s}$ , 高低空气温分布与亚南极区相近, 但高空的低温中心靠近北部, 该区域垂直剖面的相对湿度很小, 整个剖面的相对湿度小于  $40\%$ , 垂直对流很弱, 是南部和北部经向环流的过渡区。  $58^{\circ}\text{S}$  以南的极区, 风向与亚南极区类似, 介于  $240^{\circ}\sim 280^{\circ}$ , 以西风为主, 但高空与低空风速无明显差异, 整个垂直剖面的风速在  $20\text{ m/s}$  以下, 只有更加靠南的高空风速较强, 该区域垂直剖面的气温和相对湿度都比较高, 气温在  $-20^{\circ}\text{C}$  以上, 剖面的相对湿度大部分大于  $40\%$ ,  $4000\text{ m}$  以下相对

湿度更是超过了 80%，明显呈现较强的垂直对流结构，与亚南极区形成跨越极锋区的经向环流。在 8 000 m 以上的高空，各个观测要素的垂直变化很小。

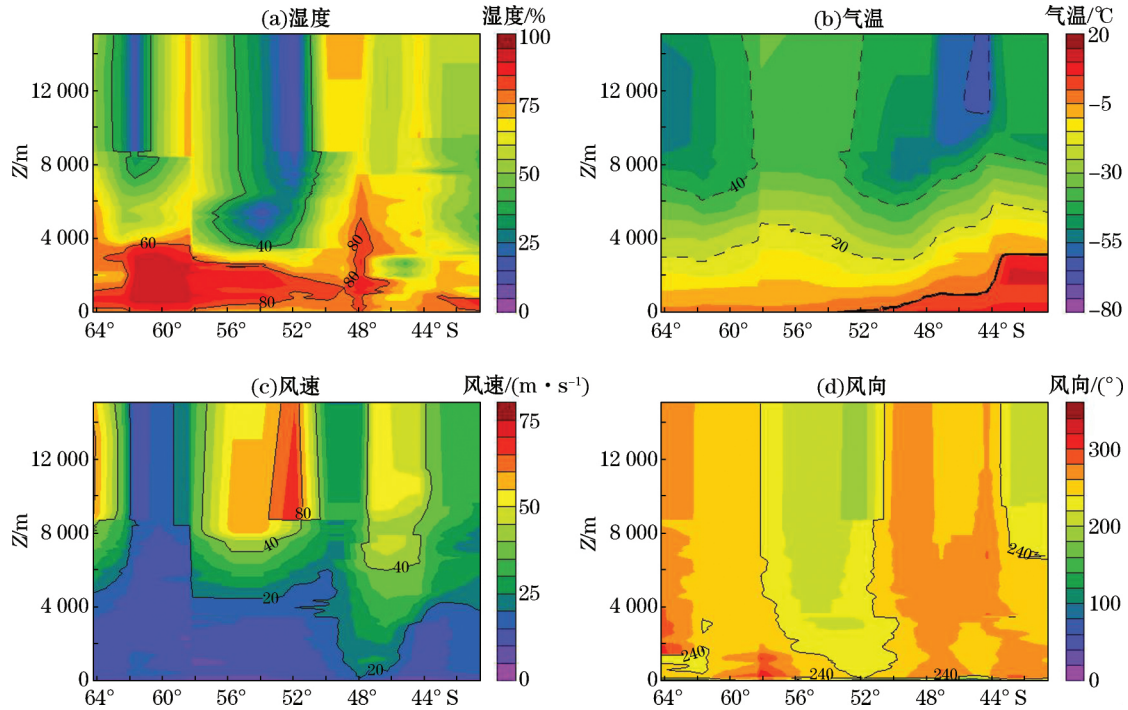


图 4 P1 断面的大气垂直剖面结构

Fig.4 The atmospheric vertical structures of section P1

第 29 航次第二次穿越西风带期间，从罗斯海返回澳大利亚霍巴特途中进行了南大洋 P2 断面的探空观测。P2 断面覆盖区域海洋表层的温度梯度显示，该断面的海洋锋面主要位于 55°~65°S，从 P2 断面探空观测要素垂直剖面(图 5)的经向梯度可以看出，低空大气温度梯度在 52°~58°S 快速变化，该区域是低空大气的主要锋面所在位置。55°S 以北的亚南极区，风向介于 120°~280°，存在东风和西风的切变，在 50°S 以北 4 000 m 以上的高空，存在强劲的西南风，风速最大值超过 30 m/s，位于 6 000~10 000 m 的高度，55°S 以北亚南极区的气温较高，海表气温在 5~10 °C，气温零线在 2 200 m 附近，气温等值线呈现上翘趋势，是典型的上升气流结构，相对湿度在整个剖面都较高，低空相对湿度超过 80%，高空的相对湿度也有 60% 以上。55°~68°S 的极锋区，风向介于 100°~220°，以东南风和西南风为主，高空与低空风速差异不大，风速在 15 m/s 以下，该区域的气温等值线平直，-10 °C 等温线位于 2 200 m 高度，4 000 m 以下相对湿度很高，超过 80%，4 000 m 以上相对湿度在 50% 以下，最低值位于 4 000~6 000 m 高度。68°S 以南的极区，风向与亚南极区类似，介于 120°~280°，6 000 m 以上的高空存在较强的西风，风速在 20 m/s 左右，6 000 m 以下低空风速很小，在 5 m/s 以内，该区域的气温更低，-10 °C 等温线位于 1 500 m 以下，11 000 m 以上的高空气温低至 -60 °C，该区域的相对湿度剖面与 55°S 以北的亚南极区相近，低空相对湿度超过 80%，高空的相对湿度也有 60% 以上，垂直对流较为明显。与 P1 断面类似，在 8 000 m 以上的高空，各个观测要素的垂直变化很小。

第 29 航次第四次穿越西风带期间，从中山站返回澳大利亚弗里曼特尔途中进行了南大洋 P3 断面的探空观测。P3 断面覆盖区域海洋表层的温度梯度显示，该断面的海洋锋面主要位于 44°~55°S，从 P3 断面探空观测要素垂直剖面(图 6)的经向梯度可以看出，低空大气温度梯度在 52°~58°S 快速变化，该区域是低空大气的主要锋面所在位置，锋面位置与 P2 断面相同。整个断面以西风为主，54°S 以北区域风向介于 260°~340°，以西北风为主，54°S 以南区域则以西南风为主。42°S 以北的区域高低空风速切变明显，4 000 m 以下

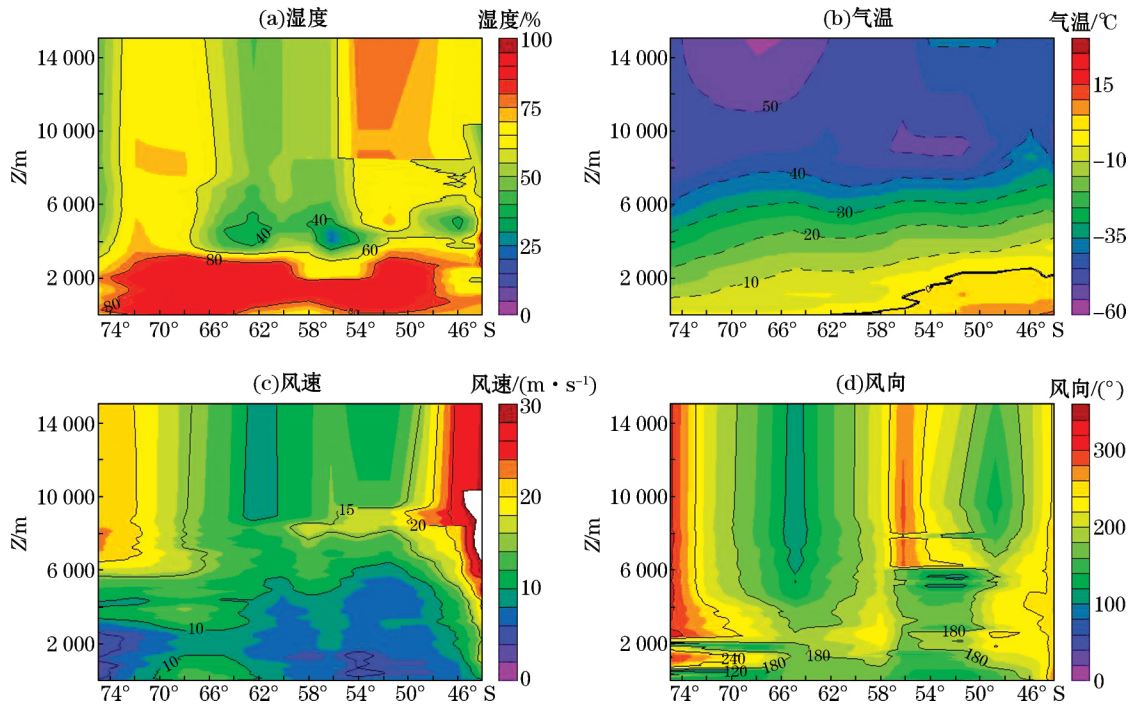


图 5 P2 断面的大气垂直剖面结构

Fig.5 The atmospheric vertical structures of section P2

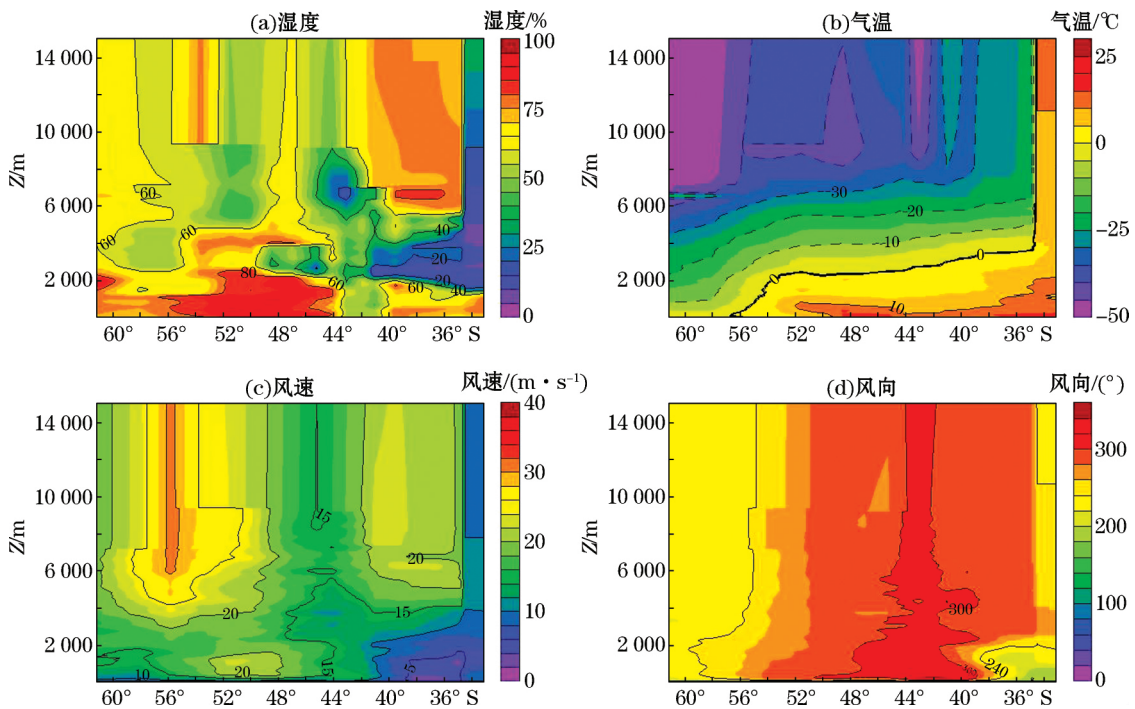


图 6 P3 断面的大气垂直剖面结构

Fig.6 The atmospheric vertical structures of section P3

风速相对较小,在 8 m/s 以内,4 000 m 以上风速在 20 m/s 以上,该区域的垂直剖面的气温均较高,6 000 m 以上高空气温仍维持在  $-30^{\circ}\text{C}$ ,使得该区域高空的相对湿度超过 50%。 $42^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{S}$  的极锋区,风速相对较小,在 10~22 m/s,6 000 m 以上的高空气温也相对较低,在  $-35\sim -50^{\circ}\text{C}$ ,4 000 m 以下低空气温较高,在  $-5\sim 20^{\circ}\text{C}$ ,使得低空相对湿度高达 80% 以上,高空相对湿度较低,在 40% 以下。 $54^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$  的极区,4 000 m 以上的高空存在 30 m/s 以上的西南风,而气温低至  $-50^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度较低。在  $58^{\circ}\text{S}$  以南海域具有风速小(4~10 m/s),相对湿度低(15%~55%),气温等值线下凹等特点,属于典型的下沉气流特征。与 P1 和 P2 断面类似,在 8 000 m 以上的高空,各个观测要素的垂直变化较小。

虽然各个断面的观测时间和观测位置不尽相同,但具有共同特征。4 000 m 以下低空的气温和湿度明显高于高空,而低空风速明显小于高空风速;8 000 m 以上高空各个观测要素的垂直变化不明显;整个断面主要以西风为主,整个垂直剖面湿度较高的区域通常是由于上升气流将海表面的暖湿气团带到高空引起的,相反,整个垂直剖面湿度异常偏低的区域通常对应下沉气流。大气锋面的位置具有明显的季节变化,东南印度洋的大气锋面中心春季(P1)比秋季(P3)更加偏北,接下来将针对季节变化进一步分析。

## 2.4 东南印度洋大气剖面的季节变化

以上主要分析了跨南大洋经向大气断面的基本特征,接下来介绍东南印度洋大气剖面的季节变化。我国南极科学考察航线多数是从东南印度洋穿越南大洋,在大多数年份,“雪龙”船都会往返穿越澳大利亚至中山站断面,虽然由于天气和海洋状况的原因,往返航线很难完全重合,但相近航线的断面观测,有利于分析南大洋大气剖面随时间的变化。图 1 所示的 P1 和 P3 断面分布比较接近,在  $45^{\circ}\text{S}$  附近交叉,该位置也恰是海洋锋面密集的海域。P1 和 P3 断面的探空观测分别于 2012 年 11 月和 2013 年 3 月完成,对南半球来说,11 月和 3 月可以看作春季(春末)和秋季(初秋)的代表月份,因此 P1 和 P3 断面的差异反映了东南印度洋经向断面在春秋两季的变化。

图 7 给出了 P3 和 P1 断面探空观测要素的差异(P3 减去 P1),可以看出,在 4 000 m 以下的低空,秋季的相对湿度低于春季的相对湿度, $40^{\circ}\text{S}$  附近的 3 000 m 高度相差超过 50%,只有南大洋中部的局部海域春

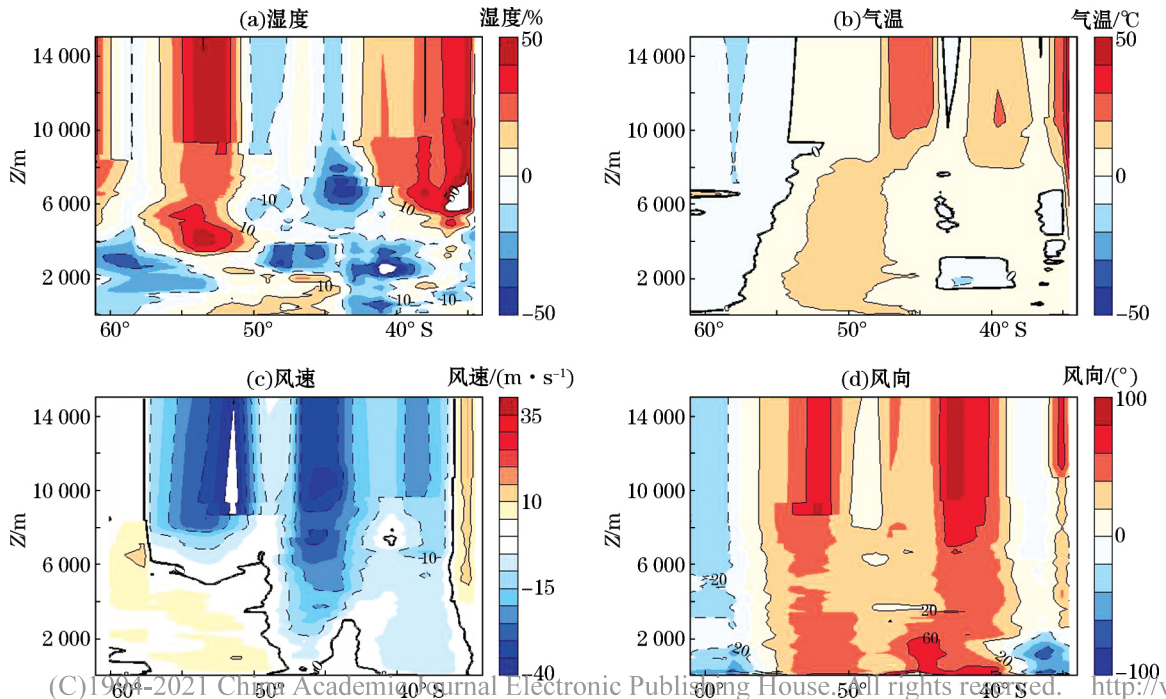


图 7 P3 和 P1 断面大气垂直剖面的差异(P3-P1)

Fig.7 The differences in atmospheric vertical structures between sections P3 and P1 (P3 minus P1)



季相对湿度较大,相差在 20%~40%;秋季的气温整体高于春季 0~20 °C,只有在 57°S 以南,春季的气温高于秋季。在 6 000 m 以上的高空,春季风速明显比秋季风速大,差值介于 10~40 m/s。6 000 m 以下低空风速的差异,南北呈现不对称分布,50°S 以南秋季风速大,而 50°S 以北春季风速大。秋季的风向以西北风为主,春季的风向以西风为主,整个垂直断面的风向相差 20°~100°。整体来说,秋季和春季相比,东南印度洋具有风速小,气温高,低空相对湿度较小。

接下来针对气温、湿度和风速三个要素分别比较不同季节断面的低空和高空差异。东南印度洋春季断面低空的气温整体低于秋季,锋面位置更加偏北,在春季,50°S 以南气温均低于 -11 °C,50°S 以北快速升温至 5 °C,而在秋季,由 58°S 以北气温快速升温至 4 °C,两个季节低空气温最大差异在 48°~53°S 附近,温差达到 19 °C(图 8a)。高空气温的差异以 55°S 为界南北反向,南部春季气温高,北部秋季气温高(图 8b)。春季的低空湿度整体高于秋季,45°S 以北的区域差异更大(图 8c),而春季的高空湿度整体低于秋季,50°S 以南更加明显(图 8d)。春季(秋季)低空风速的主轴在 47°S(52°S)附近,除了风速主轴附近之外,春季的低空风速整体略小于秋季(图 8e),而春季的高空风速远高于秋季,52°S 附近风速高出将近 50 m/s(图 8f)。综上所述,东南印度洋春季断面低空的气温整体低于秋季,锋面位置更加偏北,春季的低空(高空)湿度整体高于(低于)秋季,春季的低空(高空)风速整体略小于(远高于)秋季。

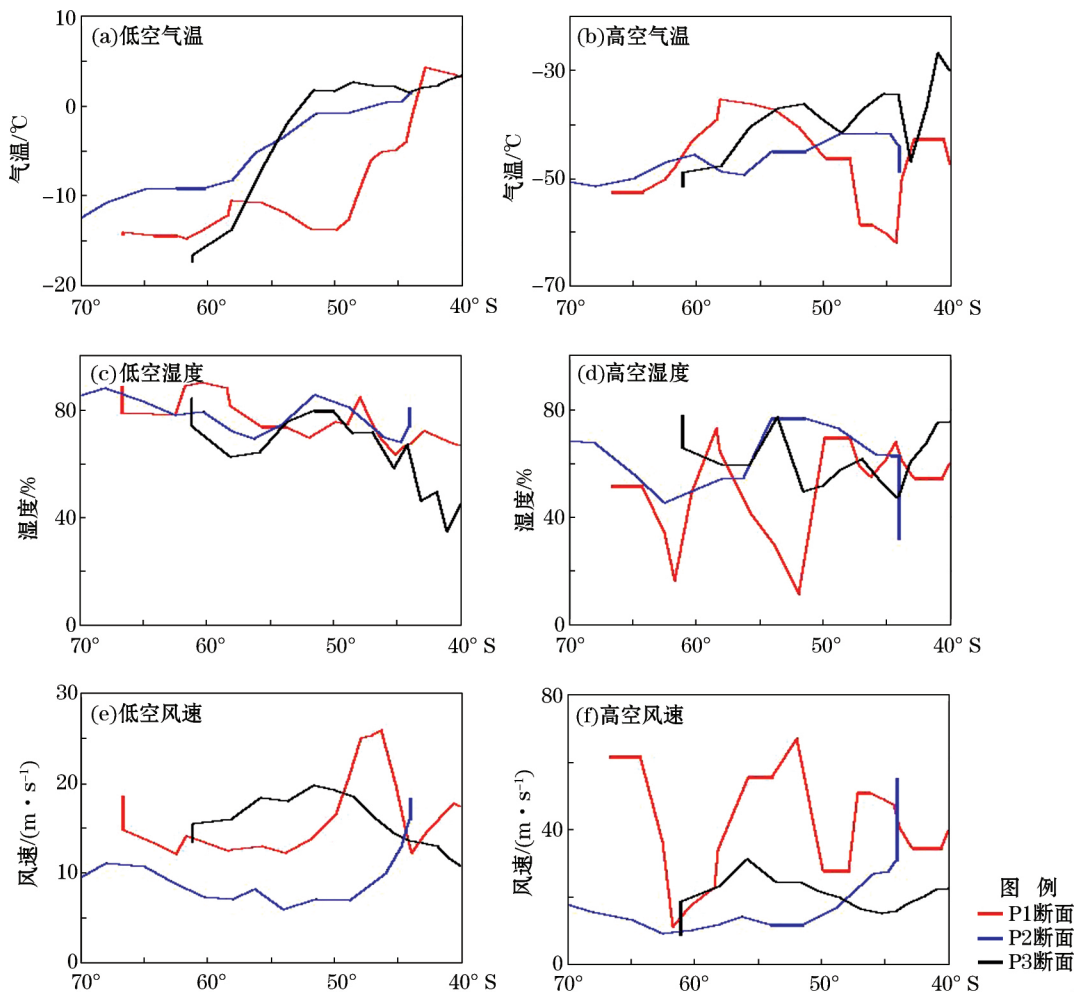


图 8 低空(0~4 000 m 平均)和高空(10 000~14 000 m 平均)大气要素的经向变化  
 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
 Fig.8 Meridional variation in atmospheric parameters in low level (0~4 000 m mean) and high level (10 000~14 000 m mean)

## 2.5 东南印度洋和西南太平洋的大气剖面差异

南大洋不同海域的大气剖面具有明显差异。我国南极考察穿越东南印度洋的南大洋断面最多,主要是由于每年雪龙船都要前往中山站执行科学考察任务,而随着我国计划在罗斯海建立新的南极考察站,穿越西南太平洋断面的航线也逐渐增多,2013年1月中旬从罗斯海返回澳大利亚霍巴特的途中也进行了GPS探空观测,即图1中的P2断面。由于P3断面是2013年3月中旬完成,因此P2和P3断面近似的可以看作南半球夏秋季的过渡期观测,因此这里选取P2和P3断面进行比较,分析东南印度洋和西南太平洋大气剖面特征的差异。

图9给出了P3和P2断面探空观测要素的差异(P3减去P2),东南印度洋断面的风速明显大于西南太平洋断面,平均差异为4~20 m/s,最大差异在50°~57°S的南大洋中部,在48°S以北3000 m以上的高空,西南太平洋断面的风速大于东南印度洋断面,平均差异为4~18 m/s,最大差异在10000 m附近,最大差异超过20 m/s。两条断面的风向相差在-30°~180°,东南印度洋以西北风为主,而西南太平洋以东南风和西南风为主,存在明显的东-西风切变。在55°S以北的海域,东南印度洋的气温高于西南太平洋4~18℃,7000 m以上的高空更加显著,只有在55°S以南的高纬度海域,东南印度洋的气温低于西南太平洋,但量值不超过10℃。相对湿度的差异与气温的差异分布大体反向,在55°S以北的海域,东南印度洋低于西南太平洋10%~30%,最大差值发生在50°S以北的2000~4000 m高度,超过40%,只有4000~6000 m高度层,东南印度洋的相对湿度略高于西南太平洋。整体来说,东南印度洋和西南太平洋相比,具有风速大,气温高,相对湿度小的特征。

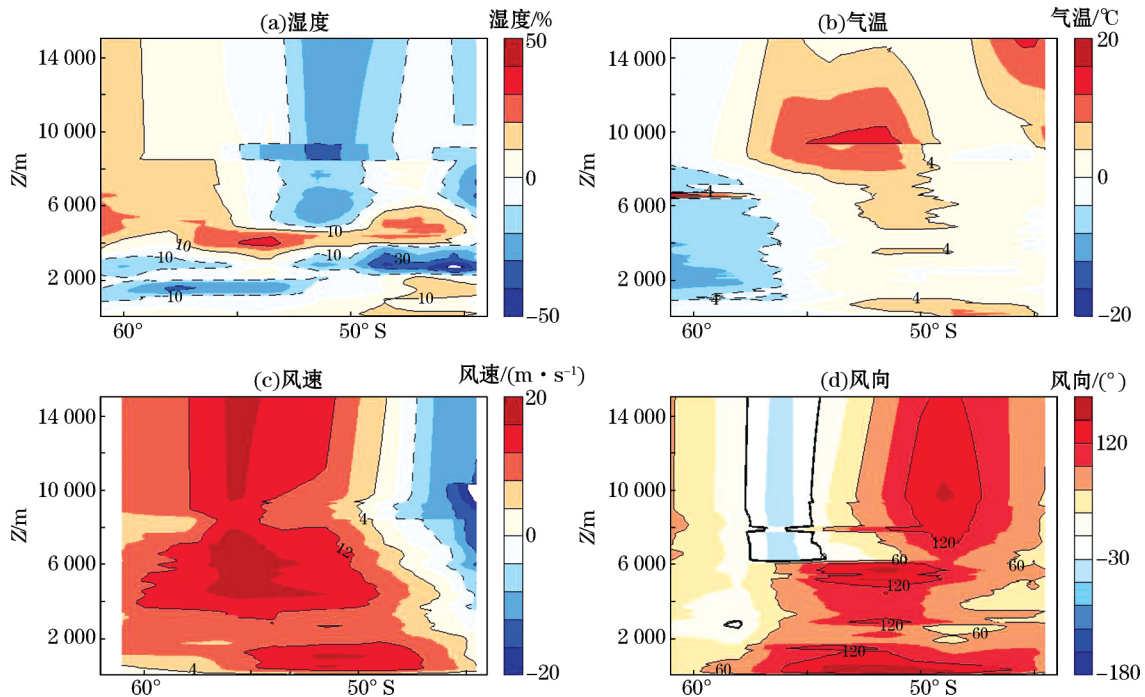


图9 P3和P2断面大气垂直剖面的差异(P3-P2)

Fig.9 The differences in atmospheric vertical structures between sections P3 and P2 (P3 minus P2)

接下来针对气温、湿度和风速三个要素分别比较不同区域断面的低空和高空差异。东南印度洋和西南太平洋的低空大气锋面均位于52°~58°S,东南印度洋在该区域的气温梯度更强,以55°S为界,以南区域西南太平洋的气温高于东南印度洋,55°S以北相反(图8a)。东南印度洋的高空气温整体高于西南太平洋(图8b)。西南太平洋的低空湿度整体高于东南印度洋,45°S以北的区域差异更大(图8c),高空湿度整体持平

(图 8d)。西南太平洋的低空和高空风速相对较小,只有断面北端的狭窄区域风速较大,东南印度洋的低空和高空风速整体高于西南太平洋,低空风速表现得尤为明显(图 8e 和 8f)。综上所述,东南印度洋和西南太平洋的低空大气锋面均位于  $52^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$ ,东南印度洋低空风速、高空风速和气温整体高于西南太平洋,西南太平洋的低空湿度整体高于东南印度洋,高空湿度整体持平。

### 3 结 论

本文利用中国第 29 次南极科学考察多次穿越南大洋的 GPS 探空数据,分析了南大洋经向断面的大气垂直结构的基本特征、季节变化和纬向差异,主要结论如下:

1) 各个断面的大气垂向结构差异显著,但也具有共同特征:4 000 m 以下低空的气温和湿度明显高于高空,而低空风速明显小于高空风速;8 000 m 以上高空各个观测要素的垂直变化较小;整个断面主要以西风为主,整个垂直剖面湿度较高的区域通常是由于上升气流将海表面的暖湿气团带到高空引起的,相反,整个垂直剖面湿度异常偏低的区域通常对应下沉气流。

2) 基于经向温度梯度和经向风分布,给出了 3 个观测断面的大气锋面位置和类型。P1 断面的大气锋面在  $47^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{S}$ ,P2 和 P3 断面的大气锋面在  $52^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$ ,P1 和 P2 的锋面属于暖锋,P3 的锋面由于气旋的影响分类不明显。

3) 东南印度洋大气剖面结构具有明显的季节变化。东南印度洋春季断面低空的气温整体低于秋季,锋面位置更加偏北,春季的低空(高空)湿度整体高于(低于)秋季,春季的低空(高空)风速整体略小于(远高于)秋季。

4) 东南印度洋和西南太平洋断面的大气剖面结构具有明显差异。东南印度洋和西南太平洋的低空大气锋面均位于  $52^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$ ,东南印度洋低空风速、高空风速和气温整体高于西南太平洋,西南太平洋的低空湿度整体高于东南印度洋,高空湿度整体持平。

本文的工作在以下方面仍有待加强:一方面,GPS 探空观测的空间分辨率仍然不高,无法对大气剖面的细微结构细致刻画;另一方面,数据只局限于一个航次的观测,没有展现特定南大洋断面大气环流的年际变化。希望今后在这两个方面加以重视,更加全面地分析南大洋大气环流结构的特征和变化。

致谢:自然资源部资助,中国第 29 次南极科学考察队采集了研究数据,国家海洋局极地考察办公室和中国极地研究中心对本工作给予了大力支持,在此表示衷心感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] RINTOUL S R, HUGHES C W, OLBERS D J. The Antarctic Circumpolar Current system[M]. Netherlands: Elsevier Science & Technology, 2001: 271-302.
- [2] SLOYAN B M, RINTOUL S R. The southern ocean limb of the global deep overturning circulation[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(1):143-173.
- [3] GAO L B, YU W D, WANG H Y, et al. Near-surface structure and energy characteristic of the Antarctic Circumpolar Current[J]. Advances in Polar Science, 2013, 25(4): 265-272.
- [4] SLOYAN B M, RINTOUL S R. Circulation, renewal, and modification of Antarctic Mode and Intermediate Water[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(4): 1005-1030.
- [5] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic  $\text{CO}_2$ [J]. Science, 2004, 305(5682): 367-371.
- [6] SALLÉE J B, LUCKENBURGH E A, BRIÈREAU N, MEYERS A, et al. Missing 66 Southern Ocean water mass circulation and characteristics in CMIP5 models: historical bias and forcing response[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(4): 1830-1844.
- [7] SOKOLOV S, RINTOUL S R. Multiple jets of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(1): 143-173.

- phy, 2007, 37(5): 1394-1412.
- [8] ORSI A H, WHITWORTH III T, NOWLIN W D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current[J]. Deep-Sea Research, 1995, 42(5): 641-673.
- [9] BELKIN I M, GORDON A L. Southern ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1996, 101(C2): 3675-3696.
- [10] KOSTIANOV A G, GINZBURG A I, FRANKIGNOULLE M, et al. Fronts in the Southern Indian Ocean as inferred from satellite sea surface temperature data[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 45(1/2): 55-73.
- [11] XIE S P. Satellite observations of cool ocean-atmosphere interaction[J]. Bull of American Meteorological Society, 2004, 85(2): 195-208.
- [12] ONEILL L W, CHELTON D B, ESBENSEN S K. Observations of SST-induced perturbations of the wind stress field over the Southern Ocean on seasonal timescales[J]. Journal of Climate, 2003, 16(14): 2340-2354.
- [13] GAO L B, RINTOUL S R, YU W D. Recent wind-driven change in Subantarctic Mode Water and its impact on ocean heat storage[J]. Nature Climate Change, 2018, 8: 58-63.
- [14] GONG D Y, WANG S W. Definition of Antarctic oscillation index[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(4): 459-462.
- [15] DIMA I M, WALLACE J M. On the seasonality of the Hadley Cell[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(12): 1522-1527.
- [16] THOMPSON D W J, WALLACE J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability[J]. Journal of Climate, 2000, 13(5): 1000-1016.
- [17] GUPTA A S, ENGLAND M H. Coupled ocean-atmosphere-ice response to variations in the southern annular mode[J]. Journal of Climate, 2006, 19(18): 4457-4486.
- [18] LIMPASUVAN V, HARTMANN D L. Wave-maintained annular modes of climate variability[J]. Journal of Climate, 2000, 13(24): 4414-4429.
- [19] HARTMANN D L, LO F. Wave-driven zonal flow vacillation in the southern hemisphere[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 55(8): 1303-1315.
- [20] CHELTON D B, SCHLAX M G, FREILICH M H, et al. Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds [J]. Science, 2004, 303(5660): 978-983.
- [21] LI X F, LI J P. Propagation characteristics of atmospheric circulation anomalies of sub-monthly southern hemisphere annular mode[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(6): 1099-1113. 李晓峰, 李建平. 月内尺度南半球环状模对应的大气环流异常传播特征[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1099-1113.
- [22] LIU L, GAO L B. Vertical structure of the low level atmosphere around the Southeast Indian Ocean fronts[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 24(2): 136-142. 刘琳, 高立宝. 东南印度洋海洋锋面低空大气的垂向分布结构分析[J]. 极地研究, 2012, 24(2): 136-142.
- [23] PEZZI L P, SOUZA R B, DOURADO M S, et al. Ocean-atmosphere in situ observations at the Brazil-Malvinas confluence region[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(22): 312-329.
- [24] KUMMEROW, CHRISTIAN, WILLIAM B, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM) sensor package[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15(3): 809-817.

## Characteristic of the Atmospheric Vertical Profiles Across the Meridional Section Over the Southern Ocean

GAO Li-bao<sup>1,2,3,4</sup>, GUO Gui-jun<sup>2,3</sup>, SHI Jiu-xin<sup>1</sup>, XUE Liang<sup>2,3</sup>,  
QU Da-peng<sup>2,4</sup>, SONG Xin-xin<sup>5</sup>, ZU Yong-can<sup>2,3</sup>

- (1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*
2. *Center for Ocean and Climate Research, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*
3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;*
4. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;*
5. *School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)*

**Abstract:** This study analyzed the basic characteristic, seasonal change and meridional variation of the atmospheric vertical structure in the southeast Indian Ocean and the southwest Pacific based on the air sounding observations obtained during the 29th Chinese National Antarctic Research Expedition (CHNARE). Although the atmospheric vertical structures are obviously different among those sections, there are still some common features. The air temperature and relevant humidity below 4000m are obviously higher than those in higher level, but the wind speed is smaller in lower level. The vertical changes of all the observational parameters above 8000m are very small, and almost all the sections are dominated by westerly winds. The area with particular high (low) vertical humidity profiles usually have upwelling (downwelling) convection. The position and type of the atmosphere fronts in the three sections are shown. The atmosphere front of P1 section is located between  $47^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{S}$ , while those of P2 and P3 sections are located between  $52^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{S}$ . Both of the fronts of P1 and P2 sections are warm fronts, but the front type of P3 section is not clear due to the impact of anonymous cyclone. The atmospheric vertical structure in the southeast Indian Ocean exhibits obvious seasonal change. The wind speed (air temperature) is smaller (higher) during austral autumn compared to austral spring. The atmospheric front position in austral autumn is further south than austral spring. The atmospheric vertical structures are different in the southeast Indian Ocean and the southwest Pacific. Both the wind speed and air temperature are higher in the southeast Indian Ocean than the southwest Pacific, while the relative humidity is smaller in the southeast Indian Ocean, but the atmospheric front positions of these two sections are almost same.

**Key words:** Southern Ocean; air sounding; atmospheric vertical profile; atmospheric front; seasonal change

**Received:** November 25, 2019