

美国墨西哥湾沿岸地区信风逆温特性的无线电探空仪观测研究

张叶晖, 张绍东, 易帆

武汉大学电子信息学院, 武汉 430079

[摘要] 通过分析美国墨西哥湾沿岸地区 9 个站点 1998–2005 年 8 年的无线电探空仪观测资料, 研究了当地信风逆温层的一些特性。发现该地区 8 年平均信风逆温出现率一般在 30%~40% 范围内, 逆温层层底高度一般都出现在 2 000~2 200 m 高度范围内, 逆温层的平均厚度、层底与层顶之间的平均温度差和平均强度变化范围分别为 250~300 m, 2.0~3.0 K 和 0.8~1.0 K/100 m 之间。该地区信风逆温出现率存在明显的季节变化, 在冬季和春季信风逆温发生较频繁, 在夏季和秋季几乎不存在信风逆温现象, 此外信风逆温出现率还存在明显的年际变化。由于墨西哥湾沿岸地区信风逆温的产生机制与夏威夷群岛的不同, 因此这两个地区信风逆温的一些基本特性、季节变化和年变化规律均不相同。

[关键词] 信风逆温; 无线电探空仪

[中图分类号] P423

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)08-0019-07

Characteristics of Trade-wind Inversion over the Gulf of Mexico Coastlands of the United States from Radiosonde Observation

ZHANG Yehui, ZHANG Shaocong, YI Fan

School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The radiosonde observations of eight years (1998–2005), launched from 9 stations over the Gulf of Mexico coastlands of the U.S., are analyzed to investigate local characteristics of Trade-Wind Inversion (TWI). Throughout the whole 8 years, the averaged occurrence rates of the TWI vary from 30% to 40%, the averaged bottom heights of the TWI vary in a range of 2 000~2 200 m, the averaged thicknesses, temperature differences between the bottom and the top of the layer and intensities range from 250~300 m, 2.0~3.0 K and 0.8~1.0 K/100 m, respectively. The occurrence rates of the TWI are higher in winter and spring and almost zero in summer and fall. The monthly-averaged occurrence rates of the TWI in whole 8 years show an obvious annual variation pattern. The seasonal and annual variability of the TWI in the Gulf of Mexico coastlands stations are inconsistent with those in Hawaii islands, and these discrepancies can be explained by different mechanisms of the TWI in these two areas.

Key Words: Trade-Wind Inversion; radiosonde

CLC Number: P423

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)08-0019-07

0 引言

一般情况下, 在低层大气中, 气温通常是随高度的增加而降低的。但有时在某些层面可能出现相反的情况, 即气温随高度的增加而升高, 这种现象称为逆温。出现逆温现象的大气层称为逆温层。

大气逆温现象普遍存在, 按形成的条件不同, 逆温可分成 5 种: 辐射逆温、平流逆温、下沉逆温、湍流逆温和锋面逆温。按逆温出现的高度不同, 地面到中间层又存在各种不同的逆温层。在边界层高度, 存在两种逆温: 接地逆温和脱地逆温。其中, 接地逆温层指逆温层的下

收稿日期: 2007-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40336054, 40575020), 长江学者和创新团队发展计划, 教育部科技重点项目资金和新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 张叶晖, 女, 武汉市珞瑜路 129 号武汉大学电子信息学院, 博士研究生, 研究方向为中高层大气; E-mail: zhangyeh@sohu.com
张绍东 (通讯作者), 男, 武汉市珞瑜路 129 号武汉大学电子信息学院, 教授, 研究方向为中高层大气; E-mail: zsd@whu.edu.cn

界接地;脱地逆温层指逆温层下界未连接地面。这两种逆温有时统称为边界层逆温。在热带和亚热带沿海一带地区,2 km 高度附近存在信风逆温 (Trade-Wind Inversion, TWI)。在温度为 0℃ 的层面有时也会存在稳定层结,称为 0℃ 逆温层^[1],一般高度约在 4 km。在热带对流层上层约 14~15 km 的高度上也会存在一类逆温层,称为对流层上层逆温^[2] (Upper-Tropospheric Inversion, UTI)。在一些高纬地区,在对流层顶温度最低值上方温度突然急剧升高,Birner^[3] 将这称为对流层顶逆温层 (Tropopause Inversion Layer, TIL)。中间层逆温层^[4-5] (Mesosphere Inversion Layer, MIL) 经常出现在中低纬地区 50~90 km 区域,通常都能被激光雷达观测到。不论是哪一种逆温,与大气对流活动、大气层结稳定、大气能量传输,甚至是对人类的生活环境都具有一定的联系。

边界层逆温直接影响大气污染物的扩散。一般来说,冬季逆温层较强较厚,持续时间较长;夏季则相对偏弱。有人称这种逆温是冬天的隐性杀人帮凶,它就像一层厚厚的被子盖在地面上空,使得空气不能向上扩散,“无路可走”又向下蔓延,从而加重了大气污染。目前,对边界层内的逆温研究逐渐增多,包括特定地形和气象条件下逆温的形成机制,逆温与大气污染成分的相互作用等。对流层上层逆温是由 Fujiwara^[2] 首先提出的,指出 UTI 可能与穿过热带对流层顶的气流传输有关,在全球的平流层结构和气候中起着重要的作用,并且与盛行在东南亚一带的东风急流有着密切的关系。中间层逆温层 (MIL) 会影响气辉层化学反应放射强度的垂直分布,通过对 MIL 现象的研究,也可以了解潮汐、重力波、行星波三者之间的相互影响和相互作用等^[4-5]。由于逆温时的大气状态十分稳定,因此在逆温层内大气的垂直运动很难发展。当大气中出现逆温层时,不论是对动力学过程还是热力学过程都会产生一定的影响。因此,研究大气中的各种逆温现象均具有重要的意义。

所谓信风逆温,简单说就是下沉逆温发生在信风区域时的逆温。它通常出现在热带海洋东部信风气流中,是副热带高压东端、自高空向下的大规模沉降空气造成。当此气流下降时,受阻于下层流向赤道的海洋空气,这两种气流在同向的水平气流相遇处生成逆温层,但不同地区产生信风逆温的机制也会不同。早在 1936 年就有有关信风逆温的报道,Ficker 在“流星”船考察观测中发现,海洋气层上面为“信风逆温”所覆盖,有信风逆温的地方,低云的最大发展高度受到限制,大西洋上海洋气层在南北纬度 15° 的两个区域附近最薄,向海洋西部和信风汇合区厚度增加,在北太平洋东部的逆温层高度向西也有类似的抬高,这已为 Neiburger, Beer 和 Leopold, Neiburger, Johnson 和 Chien 的大量研究所证实^[6]。

近年来,关于信风逆温的研究大都集中在大西洋、太平洋区域^[7-9]和夏威夷群岛^[10-11]。洋面上的信风逆温

研究大部分是利用航海船 Cruise 的探空资料,Cruise 数据资料的优点是有不同的时间段、不同经纬度的数据资料,覆盖范围广,可以得到赤道以南和以北的数据。得到的数据除了可以研究信风逆温的基本特性外,还可以研究信风逆温特性的纬度变化规律。夏威夷群岛上的信风逆温研究大多利用的是每天两次的 Rawinsonde 数据,一般还会结合当地降雨和云层的数据等进行分析。其他区域的信风逆温的研究报道则相对较少。然而,信风逆温是调节对流活动的一个重要因素,对低层大气的相对湿度、云层分布、降雨等有着紧密的联系,因此,研究信风逆温现象是非常有意义的。

目前,对于不同地区存在的信风逆温事件已有很多报道,而且各地区的信风逆温形成机制也已经相对明了,但是由于信风逆温的特征在时间和空间两方面变化都很大,有关信风逆温的一些特性(例如信风逆温层层底高度、逆温层的厚度和强度、逆温的季节变化、年变化等)的相关报道却很少。本文利用美国墨西哥湾沿岸 9 个站点的探空资料研究当地信风逆温的一些特性,例如逆温层层底高度、逆温的出现率、逆温层的厚度和强度等;利用 8 年的探测资料研究了当地信风逆温发生率的季节变化和年际变化规律,并与夏威夷地区所得到的结果相比较;讨论了这两个地区不同的信风逆温产生机制,并解释了这两个地区信风逆温特性存在差异的原因。

1 数据资料和分析方法

本文的观测数据是从 SPARC 数据中心 (<http://www.sparc.sunysb.edu/>) 下载的从美国 93 个站点探空仪资料中选择出的美国南部墨西哥湾沿岸地区的 9 个站点数据,它们分别是:Key West, Florida (24.5°N, 81.8°W), Miami, Florida (25.75°N, 80.38°W), Brownsville, Texas (25.9°N, 97.43°W), Tampa Bay, Florida (27.7°N, 82.4°W), Corpus Christi, Texas (27.8°N, 97.5°W), Lake Charles, Louisiana (30.12°N, 93.22°W), Slidell, Louisiana (30.33°N, 89.82°W), Tallahassee, Florida (30.38°N, 84.37°W) 和 Jacksonville, Florida (30.5°N, 81.7°W)。其地理分布如图 1 所示,纬度分布范围为 24.5°N~30.5°N,经度分布范围为 80.4°W~97.5°W。对于温度的测量,在美国 93 个站点中,约 70% 的站点使用的是 Väisälä RS-80 系列 Radiosonde,约 30% 的站点使用的是 VIZ B2 系列 Radiosonde。前者测量温度的精度约为 0.2 K,后者测量温度的精度约为 0.3 K^[12]。探空仪数据每天 2 次 (0000 UTC 和 1200 UTC),原始的压强、温度、湿度数据的采样时间间隔约为 6 s,气球的上升速度平均为 5 m/s,因此温压湿数据的高度采样间隔约为 30 m,这是不均匀采样值。为了处理方便,我们对原始数据进行了线性插值,得到了高度分辨率为 50 m 的温度、压强和湿度数据,

作为下面分析处理的数据文件。利用 1998–2005 年共 8 年的数据,研究了美国南部墨西哥湾沿岸地区 9 个站点的信风逆温年变化特性。



图 1 所用 Radiosonde 站点地理分布图

Fig. 1 Geographic distribution of radiosonde stations used in this study

在所选 9 个站点的 8 年数据中,Corpus Christi 站 2000 年数据缺失,2005 年 10–12 月数据缺失;Brownsville 站 2003 年 6 月数据缺失;Slidell 站 2005 年 8 月数据缺失;Tallahassee 站 2005 年 10 月数据缺失。

一般研究逆温时都是用温度的垂直递减率判断大气是否存在逆温层。例如,Fujiwara^[2]在研究 UTI 时,逆温层的判据是 $\partial T/\partial z > 2.0 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$;而 Schubert^[13]在研究信风逆温时,依据 $\partial T/\partial z > 4.0 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ 判断是否存在强的信风逆温层。但是,考虑到可能存在 ΔT 很大,而 Δz 也很大,导致 $\Delta T/\Delta z$ 很小的情况,那么用 $\partial T/\partial z$ 作为判据就有可能漏掉这种情况。因此,本文是用垂直方向上下等压面的温度差(ΔT)作为判据的。当上下等压面的温度差 $\Delta T > 1 \text{ K}$ 时,即判断存在一个逆温层,上下等压面的高度差就定义为逆温层的厚度,下层等压面对应的高度为逆温层层底高度,本文中用逆温层内温度垂直递增率($\Delta T/\Delta z$)来表示逆温层的强度,单位为 $\text{K}/100 \text{ m}$ 。本文研究的信风逆温一般都是发生在高度 2 km 附近,所以研究重点在高度范围 1~5 km 以内,下面给出的各参量随高度的变化都指定在 1~5 km 范围内。由于使用的探空资料的垂直分辨率是 50 m,而研究的信风逆温层平均厚度约为 300 m,因此本文得出的逆温层厚度可能比真实值大,强度则可能比真实值小。

2 结果分析

本文的目的是研究美国墨西哥沿岸地区信风逆温层的特性和年变化、季节变化规律。文中先从单个站点的信风逆温特性研究入手,得到该站点的信风逆温的

各种特性;再对其他 8 个站点的信风逆温特性进行统计分析,得到该地区信风逆温的季节变化规律和年变化规律。单个站点研究使用的是 Jacksonville (Florida) 站点 ($30.5^\circ\text{N}, 81.7^\circ\text{W}$) 2004 年的数据,因为该站点在 2004 年存在较为明显的信风逆温现象。

2.1 单个站点信风逆温特性研究

图 2 给出了 Jacksonville 站 2004 年 3 月和 8 月温度-高度截面图,图中连续的温度曲线均向右平移 4 K。在 3 月上旬和下旬,2 km 附近均存在明显的逆温现象。尤其是在 3 月的前几天,逆温持续存在,大概持续了 6 天。相比较 8 月份,在 2 km 附近并没有观察到信风逆温现象。根据整年的数据分析,信风逆温在冬季和春季的发生率较高,在秋季和夏季几乎看不到信风逆温的存在。

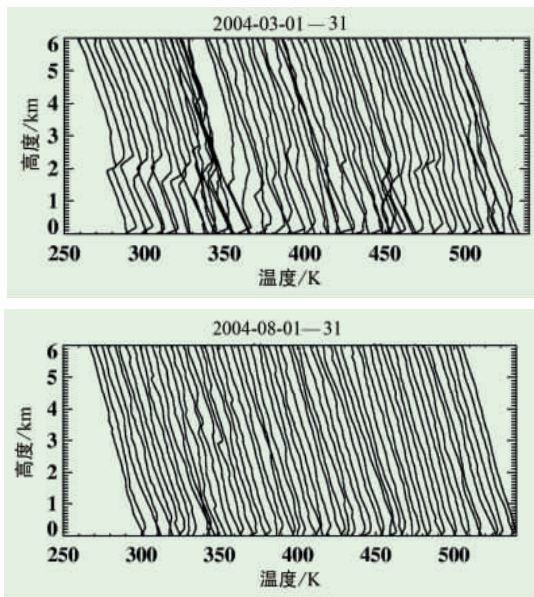
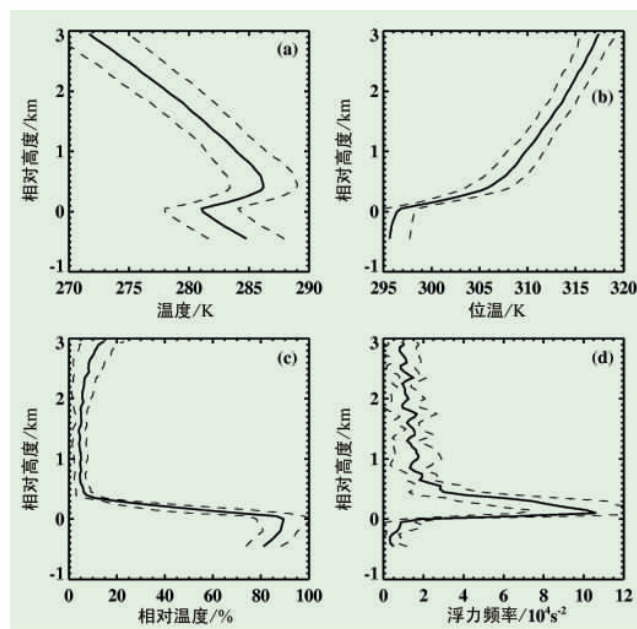


图 2 Jacksonville 站 ($30.5^\circ\text{N}, 81.7^\circ\text{W}$) 2004 年 3 月和 8 月温度随高度变化特征

Fig. 2 Temperature profiles observed at Jacksonville ($30.5^\circ\text{N}, 81.7^\circ\text{W}$) station during March and August, 2004. Radiosondes were launched at 12-hour intervals during these periods. Successive profiles are displayed in an interval of 4K

为了更好地了解在逆温层附近的垂直结构,文章采用相对高度研究逆温发生时对应的温度、位温、相对湿度和浮力频率在逆温层垂直高度附近的变化特征。将逆温层层底高度设为基准点,即相对高度 $z=0$ 。图 3 给出的就是 Jacksonville 站点 2004 年 3 月 1–6 日 12 个剖面的温度、位温、相对湿度和浮力频率的平均值随相对高度的变化特征图。本文研究的高度范围是 1~5 km,而逆温层出现的高度一般约为 2 km,因此相对高度的范围一般均在-1~3 km 之间。从图 3 中可以看出这段时间信风逆温层的一些基本特性。逆温层的平均厚度约为 400 m,逆温层层底与层顶的温度差和位温差值分别约

为 5 K 和 10 K。相对湿度在逆温层层内急剧下降,这里使用的相对湿度虽然没有经过修正,但也可以反映出逆温层上下水气的情况。由于逆温层的存在,阻碍了水气向上流动,因此在逆温层层底相对湿度很大,一般聚积了大量的云层。因此,一般信风逆温层以下的气流极为潮湿且积云密布(信风积云),其上空气温暖且极干燥(称为高空气团,Superior air)。值得提出的是,不只是在信风逆温层内出现湿度的骤降,在 3 km 的逆温层、0℃ 的逆温层^[1]和 12~13 km 的对流层上层逆温层^[2]均存在这一现象。在逆温层以下浮力频率相对很小,接近于 0;在逆温层内浮力频率却比背景值大数倍;在逆温层以上浮力频率也相对较小,但仍然略大于逆温层下面的浮力频率值。这说明在逆温层下面存在强对流,而在逆温层内是相对稳定的。Fulks^[14]指出,逆温层对于位势不稳定的生成起着重要的作用。对于强的逆温层,开始时它阻止深对流活动,如果高低层平流不同并且有关过程很显著、持续的时间很长,位势不稳定可以增大得非常显著,最后有某种机制把逆温层破坏掉,这时在逆温层下面的湿空气中已经生成的层积云或发展不充分的积云能无阻挡地向上发展,形成积雨云。因此,信风逆温层与当地云层分布和降雨情况等有着紧密的联系^[15]。



——物理量的平均值 (average value)
 -----标准偏差 (standard deviation)

图 3 Jacksonville 站 2004 年 3 月 1~6 日温度、位温、相对湿度和浮力频率的平均值相对于逆温层层底高度的变化特征

Fig. 3 Composite profiles of temperature, potential temperature, relative humidity (without correction) and buoyancy frequency relative to the inversion altitude where temperature has a local minimum in each profile from March 1 to March 6, 2004

2.2 信风逆温季节变化、年变化

图 4 是 Jacksonville 站点逆温层层底高度和厚度的月变化图,是将每个月的 8 年总的逆温事件的特性参量取平均值得到。可以看到,7 月的逆温层层底高度和厚度均是一个峰值,这是由于 6,7,8 这 3 个月信风逆温事件出现较少,所得到的逆温层平均层底高度和厚度的统计结果可信度不高,不具有代表性,在分析时只考虑除去这 3 个月以外的其他月份。从图中还可以看到,逆温层层底高度,除了 6,7,8 这 3 个月以外,其他月份的平均层底高度变化不大,均在 2 km 附近。其中最小值出现在 2 月份,层底高度在 2 km 以下;最大值出现在 1 月,最大值与最小值之间的差距不超过 200 m。对于逆温层厚度,明显有冬季大于夏季;春季和秋季的比冬季的均小一些,变化范围为 250~340 m,最大值出现在 12 月,最小值出现在 6 月。这与 Chen^[11]2006 年报道的有关夏威夷信风逆温的特性有很大的不同。该文中提到,夏威夷群岛全年逆温层层底高度全年有 2 个最大值——9~10 月和 4 月,而最小值也有 2 个——1 月和 6 月;逆温层厚度变化范围为 300~670 m,全年的最大值出现在 6 月,最小值出现在春天。

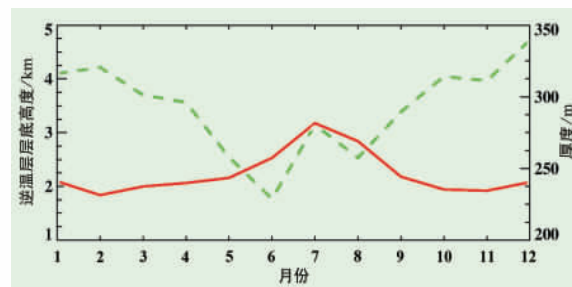


图 4 Jacksonville 站逆温层层底高度(实线)和厚度(虚线)的月变化

Fig. 4 Monthly variability of bottom height (km, solid line) and thickness (m, dashed line) of trade inversion layer at Jacksonville station in the 8 years

表 1 是 Jacksonville 站点 1998~2005 年间对每一年存在的所有信风逆温事件的参量统计结果。表 1 中从上到下依次列出的特性参量是全年逆温发生率、层底高度、层顶高度、厚度、温度差值和逆温层强度(K/100 m)。可以看出,在 Jacksonville 站点,8 年的逆温年平均发生率一般都在 30% 以上,但最大不超过 40%;最大值出现在 2000 年,最小值出现在 2002 年。2002 年不仅是逆温年平均发生率最小的一年,而且逆温层的平均强度在这 8 年中也是最小的。逆温层的平均层底高度为 2 000~2 300 m,最大值与最小值之间相差约 300 m,这与前面统计得到的逆温层的平均层底高度月变化关系是一致的,说明在墨西哥湾沿岸地区信风逆温出现的高度还是比较稳定的。逆温层平均厚度为 280~310 m,逆温层层

表 1 Jacksonville 站 1998–2005 年逆温层特性统计结果

Table 1 Statistics of characteristics of trade inversion layer at Jacksonville in 1998–2005

信风逆温判据 $\Delta T > 1 \text{ K}$	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
逆温发生率 /%	34.8	30.6	36.4	30.3	26.4	30.1	34.6	31.5
层底高度/m	2 100	2 100	2 300	2 300	2 200	2 100	2 300	2 000
层顶高度/m	2 400	2 300	2 600	2 600	2 500	2 400	2 600	2 300
厚度/m	282	279	283	2852	303	308	310	282
温度差值/K	2.3	2.2	2.2	2.0	2.2	2.4	2.4	2.2
强度/ $\text{K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$	0.83	0.78	0.77	0.75	0.72	0.80	0.80	0.75

底与层顶的温度差为 2.0~2.4 K, 2003 年和 2004 年的温度差值最大, 其他年份的温度差值均在 2.2 K 左右, 逆温层的平均强度基本上在 0.7~0.8 K/100 m。

由 Jacksonville 站点 1998–2005 年计算的每月平均逆温出现率, 得到逆温发生率的变化图(图 5)。从图中可以观察到与图 4 相同的结果, 信风逆温出现率一般都是春季和冬季高, 夏季和秋季低, 其中有几年夏天基本上没有发生信风逆温事件。图中还可以看到, 逆温发生率存在明显的年际变化特征。在 8 年的逆温平均发生率中, 1998 年 4 月的逆温发生率最大, 其次是 1999 年 12 月, 发生率均超过 65%, 其余各年份的最大值也是发生在冬季或春季。从 8 年的逆温发生率年变化图中还是可以观察到有细微的年际变化存在, 2000–2003 年的信风逆温出现率呈减弱的趋势, 2003 年 10 月开始逆温发生率又开始增加。而在夏威夷群岛, 信风逆温常年

存在, 逆温发生率最小值出现在 1 月 ($\approx 35\%$), 逆温发生率 5–9 月持续在 75%~80%^[11]。

美国墨西哥湾沿岸地区与夏威夷群岛的信风逆温的季节变化特性有如此大的不同, 可能是由于导致这两个地区信风逆温产生的机制不同。对于夏威夷群岛, 在北半球夏季, 大陆上气压降低, 在海洋上, 气压升高了, 太平洋上有北太平洋高压或称夏威夷高压。由于北太平洋高压的增强, 太平洋热带气团便沿着北太平洋高压的西部边缘, 以东南风吹到亚洲东南岸, 这种东南风即为东亚的夏季风。而高压的东缘则使东北信风加强, 把温带气团带到低纬度, 在信风低层造成逆温层, 使得信风具有显著的垂直稳定度。这就可以解释为什么在夏威夷群岛上 6 月份的信风逆温层厚度最大。对于美国墨西哥湾沿岸地区, 就要考虑它所处的地理位置。在它的西面是落基山脉, 在落基山以东常伴有气旋生成, 而墨西哥湾流是

世界大洋中最强大的暖流, 携带着巨大的热量, 高湿空气从墨西哥湾向北输送。因此, 当温暖空气平流到低海拔地区内积聚的冷空气上面, 就形成逆温。这种逆温的强弱就取决于暖空气与低海拔地区低空冷空气的温差。一般来说, 冬季中纬度沿海地区海上温度高、陆上温度低, 当海上暖空气流到大陆上时易形成逆温现象。另外, 美国墨西哥湾沿岸地区位于 24.5°N ~ 30.5°N, 在热带 Hadley 环流圈内, 热带偏极区地区的下沉分支气流中, 在最冷的季节(12–2 月), 主要由于辐射冷却使空气穿过等熵面下沉, 产生大范围的、缓慢的下沉运动, 也会导致逆温的产生; 而在夏季, 在北半球由于能量经向交换需要量较小——这可以从极锋活动及其相应的急流的减弱看出来, 因此下沉运动也弱得多。这也可以解释为何在美国墨西哥湾沿岸地区, 冬季信风逆温出现率比夏季高得多^[6]。

为了研究美国墨西哥湾沿岸地区的信风逆温特性是否存在纬度或经度的变化特性, 除 Jacksonville 站点外, 我们还用到了其他 8 个站点, 分别是 Key West, Florida; Miami, Florida; Brownsville, Texas; Tampa Bay, Florida; Corpus Christi, Texas; Lake Charles, Louisiana; Slidell, Louisiana 和 Tallahassee, Florida。由于月变化图与 Jacksonville 站得到的基本相似, 这里只给出其中 3 个站点的逆温发生率的月变化图。

从 Key West, Brownsville, Tampa Bay 和 Jacksonville 这 4 个站点的 8 年的逆温平均发生率月变化图(图 6)可以看出, 这 4 个站点的逆温发生率变化趋势非常相似, 最小值均在 6–9 月, 多持续在 10% 以下; 最大值出现在 11–12 月和 1 月, 多为 60% 左右。从图中可以看出, 在冬季和春季, 逆温发生率均是 Brownsville 站的最大、Jacksonville 站的最小。从这两个站点的地理位置看, Brownsville 站的经度在这 4 个站点中最大, 而 Jacksonville 站最小。这似乎暗示, 在信风

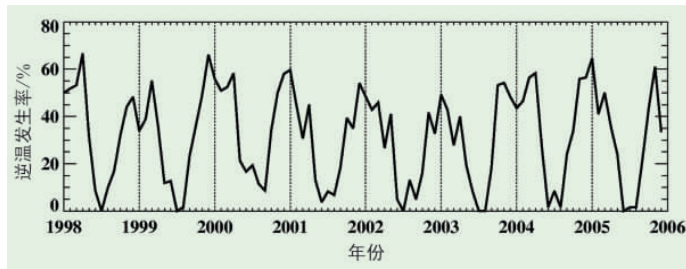


图 5 Jacksonville 站逆温发生率的年变化

Fig. 5 Time series of monthly-averaged frequency of occurrence of trade inversion at Jacksonville station

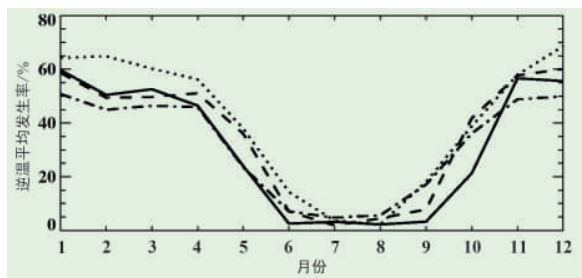


图6 Key West (实线), Brownsville (点线), Tampa Bay (虚线)和 Jacksonville (虚点线)4个站点
8年的逆温平均发生率月变化图

Fig. 6 Monthly variability of frequency of occurrence of trade inversion over Key West (solid line), Brownsville (dotted line), Tampa Bay (dashed line) and Jacksonville (dashed-dotted line) stations in the 8 years

逆温的高发期(冬季和春季),逆温发生率向西增加,即随着经度的增加逆温发生率也增大。而在信风逆温的低发期(夏季和秋季),从各站点的经度来看又好像并不存在这个规律,只是在4个站点中纬度最低的 Key West 站在这两个季节,信风逆温发生率一直是最低的。

表2给出了美国墨西哥湾沿岸9个站点8年的逆温特性统计,是8年所有的逆温事件的统计平均结果,纬度由低到高排列。第1列为站点名称和经纬度;第2~4列分别为逆温事件总个数、得到的有效的温度数据个数和总的逆温发生率;第5~8列分别为逆温层层底高度、层顶高度、层底温度和层顶温度;第9~11列分别表示逆温层厚度、层顶与层底温度差值和逆温层强度。

表2 美国墨西哥湾沿岸9个站点8年逆温特性统计
Table 2 Statistics of characteristics of trade inversion layer at 9 stations
over the Gulf of Mexico coastlands of the US in the 8 years

站点	逆温 事件数	有效温度 数据	逆温发生率 /%	层底高度 /m	层顶高度 /m	层底温度 /K	层顶温度 /K	厚度 /m	层顶与层底 温度差/K	强度 /K·(100 m) ⁻¹
Key West (24.5°N, 81.8°W)	1 777	5 590	31.8	2 200	2 400	281.6	284.3	254.1	2.7	1.09
Miami (25.75°N, 80.38°W)	1 994	5 645	35.3	2 100	2 300	281.5	284.3	255.0	2.7	1.11
Brownsville (25.9°N, 97.43°W)	2 275	5 553	41.0	2 000	2 200	283.3	286.0	256.5	2.7	1.07
Tampa Bay (27.7°N, 82.4°W)	2 016	5 670	35.6	2 100	2 400	280.5	283.1	260.6	2.6	1.03
Corpus Christi (27.8°N, 97.5°W)	1 912	4 849	39.4	2 000	2 300	282.2	284.8	256.4	2.6	1.02
Lake Charles (30.12°N, 93.22°W)	2 267	5 723	39.6	2 100	2 400	282.0	282.4	267.1	2.4	0.92
Slidell (30.33°N, 89.82°W)	2 203	5 639	39.1	2 000	2 300	279.8	282.3	263.6	2.5	0.97
Tallahassee (30.38°N, 84.37°W)	2 056	5 530	37.2	2 100	2 400	279.2	281.6	256.9	2.4	0.96
Jacksonville (30.5°N, 81.7°W)	1 819	5 717	31.8	2 100	2 400	279.1	281.5	306.9	2.4	0.80

从表2可以看出,这9个站点的纬度只相差6°,信风逆温的各参量特性基本相似。例如,8年的平均逆温发生率一般都是在30%~40%,信风逆温层层底高度各站点变化不大。但如果将这些站点以30°N和90°W为分界线,各站点的信风逆温特性还是存在细微的差异。例如,从纬度上看,信风逆温的层底与层顶的温度差,纬度小于30°N的5个站点略大于纬度大于30°N的4个站点,而且前者的逆温层强度均大于1.0 K/100 m,后者的则都小于1.0 K/100 m。这说明信风逆温在纬度高

的地区对应的强度相对小一些。从经度来看,经度大于(接近)90°W的4个站点的平均逆温发生率随经度的增加而增大,而且比经度小于90°W的其他5个站点的平均逆温发生率都大一些。这与前面由逆温平均发生率的月变化关系得到的、在信风逆温的高发期(冬季和春季)、逆温平均发生率向西增加的结果是一致的。

3 讨论与结论

通过分析美国墨西哥湾沿岸9个站点1998~2005

年 8 年的探空资料,研究当地信风逆温层的一些特性,发现该地区 8 年平均信风逆温出现率一般在 30%~40% 范围内,逆温层层底一般都出现在 2 000~2 200 m 高度范围内,逆温层的平均厚度约为 250~300 m,逆温层层底与层顶之间的平均温度差为 2.0~3.0 K,逆温层平均强度一般为 0.8~1.0 K/100 m。

Dohrenwend^[16-17]的文章中提到,信风逆温可以被认为是组成 Hadley 环流的一部分,它一般都出现在远离赤道辐合带(ITCZ)的低海拔地区和赤道辐合带附近的高海拔地区。本文研究的是美国墨西哥湾沿岸地区的信风逆温特性和季节、年变化规律,利用了 9 个站点的 Radiosonde 数据,纬度分布范围是 24.5°N~30.5°N,经度分布范围是 80.4°W~97.5°W,属于远离赤道辐合带地区,而这 9 个地区的海拔也都很低,大部分均在 10 m 以内,最高的也只有 36 m,与 Dohrenwend 得出的结论是一致的。

通过分析发生信风逆温时各大气参量的变化特征,发现相对湿度在逆温层层内急剧下降,由于逆温层的存在,阻碍了水气的向上流动,因此在逆温层层底相对湿度很大,一般聚积了大量的云层。在逆温层以下浮力频率相对很小,接近于 0,在逆温层内浮力频率却比背景值大数倍,在逆温层以上浮力频率也相对较小,但仍然略大于逆温层下面的浮力频率值。这说明在逆温层下面存在强对流,而在逆温层内是相对稳定的。这表明信风逆温的存在与云层分布、降雨量、对流强度等有着密切的联系,而这些均与自然天气状况、人类的生活环境直接相关。

本文还分析了美国墨西哥湾沿岸地区信风逆温的季节变化和年变化规律。在冬季和春季信风逆温发生较频繁,在夏季和秋季几乎不存在信风逆温现象,并且存在明显的周年变化。但是,该地区信风逆温的基本特性、季节变化规律和年变化规律与夏威夷群岛观测到的信风逆温有很大的不同。夏威夷群岛上的信风逆温常年存在,逆温层层底高度在秋季和春季相对高一些;而美国墨西哥湾沿岸地区信风逆温在冬季和春季的发生率却比秋季和夏季高得多,这种差异可以用两地区信风逆温的不同产生机制解释。夏威夷群岛的信风逆温是由于副热带高压的变化影响产生的,而墨西哥湾沿岸地区则是由于温暖空气从墨西哥湾平流到该地区 and Hadley 环流的热带偏极区地区的下沉分支气流共同导致产生的。

参考文献(References)

- [1] JOHNSON R H, CIESIELSKI P E, HART K A. Tropical inversions near the 0°C level [J]. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 1838-1855.
- [2] FUJIWARA M, XIE S -P, SHIOTANI M, *et al.* Upper - tropospheric inversion and easterly jet in the tropics [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 (D24): 4796, doi: 10.1029/2003JD003928.
- [3] BIRNER T, SANKEY D, SHEPHERD T G. The tropopause inversion layer in models and analyses [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L14804, doi: 10.1029/2006GL026549.
- [4] MERIWETHER J W, GARDNER C S. A review of the mesosphere inversion layer phenomenon [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 12405-12416.
- [5] MERIWETHER J W, GERRARD A J. Mesosphere inversion layers and stratosphere temperature enhancements [J]. *Rev Geophys*, 2004, 42: RG3003, doi:10.1029/2003RG000133.
- [6] PALMÉN E, NEWTON C W. Atmospheric circulation systems: Their structure and physical interpretation [M]. New York: Academic Press, 1969: 281-286.
- [7] HARAGUCHI P Y. Inversions over the tropical eastern Pacific Ocean[J]. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 177-185.
- [8] HASHIZUME H, XIE S -P, FUJIWARA M, *et al.* Direct observations of atmospheric boundary layer response to SST variations associated with tropical instability waves over the eastern equatorial Pacific [J]. *J Clim*, 2002, 15: 3379-3393.
- [9] AUGSTEIN E, SCHMIDT H, OSTAPOFF F. The vertical structure of the atmospheric planetary boundary layer in undisturbed trade winds over the Atlantic Ocean [J]. *Bound Layer Meteor*, 1974, 6: 129-150.
- [10] MENDONCA B G, IWAOKA W T. The trade wind inversion at the slopes of Mauna Loa, Hawaii [J]. *J Appl Meteor*, 1969, 8: 213-219.
- [11] CHEN Yi-leng. Final Report of Project: Characteristics of Trade -wind Inversion over the Hawaiian Islands [R]. Honolulu: University of Hawaii, 2006.
- [12] WANG L, GELLER M A, ALEXANDER M J. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters, Part I: Intrinsic frequency, wavelength, and vertical propagation direction[J]. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 125-142.
- [13] SCHUBERT W H, CIESIELSKI P E, LU C, *et al.* Dynamical adjustment of the trade wind inversion layer[J]. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 2941-2952.
- [14] FULKS J R. The instability line. *Compendium of Meteorology* [M]. T F Malone, Ed. Boston, Massachussettes: Amer. Meteor. Soc, 1951: 647-652.
- [15] JOHNSON R H, RICKENBACH T M, RUTLEDGE S A, *et al.* Trimodal characteristics of tropical convection [J]. *J. Climate*, 1999, 12: 2397-2418.
- [16] DOHRENWEND R E. The energetic role of the trade wind inversion in a tropical subalpine ecosystem [D]. Syracuse: Suny College of Forestry. 1972: 298.
- [17] STADTMÜLLER T. Cloud forests in the humid tropics [M]. The United Nations University, Tokyo, Japan: United Nations University Press, 1987. (责任编辑 朱宇)