

基于探空数据的南海悬空波导预测模型研究

成印河, 钟卫, 赵彬彬, 乔文丽*, 李晓冉

(江苏海洋大学海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222005)

摘 要: 通过分析南海全球定位系统探空数据, 揭示南海悬空波导的形成规律及其与海洋大气边界层高度的显著相关性。结果表明: 南海悬空波导的发生概率约为 60%, 波导平均陷获层高度为 786 m, 平均海洋大气边界层顶高度为 894 m, 两者相关系数为 0.64, 存在较强的相关性; 悬空波导强度和厚度与海洋大气边界层高度的关系不明显。98% 的悬空波导由湿度随高度锐减引起, 其中约 50% 伴随着逆温现象。基于这些发现, 建立了一个基于近海面温度和陷获层底温差估算悬空波导顶高的经验模型, 在南海的应用表现优于美国卫星海上悬空波导高度估算技术。

关键词: 南海; 悬空波导; 海洋大气边界层高度; 经验模型

中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)06-0044-09

0 引言

大气波导是海上大气环境尤其是低空大气层中^[1-2]最常出现的折射现象。大气波导可以显著改变电磁波的传播路径, 使雷达能够实现超视距探测, 同时也可能导致探测盲区的出现^[3-4], 这在海上战场环境研究中具有重要应用价值^[5-7]。大气边界层是地球表面和大气之间物质和能量交换的桥梁, 地表的物质和能量主要在该层内消耗和扩散^[8]。大气边界层高度是表征其结构的重要参数, 同时也是大气数值模拟和环境评估中的重要物理参数^[9]。大气边界层顶高度通常被定义为逆温层底, 逆温层的存在在一定程度上会促进大气波导的发生。因此, 许多专家学者认为, 在理想状态下, 大气波导陷获层底高与大气边界层的顶部高度应保持一致^[10]。然而, 大气波导特别是悬空波导与大气边界层顶之间的关系, 以及边界层顶波导的形成机制等问题仍值得深入研究。

利用卫星云图、天气图等预测低空大气波导尤其是悬空波导, 是一种较为经济且便捷的方法。该

方法通过分析天气系统的演变规律来预测相关海域的折射条件, 从而提取大气波导的特征信息。早在 20 世纪 70 年代初, 美国海军就提出了基于卫星云图和天气图预测大气折射的方案——《折射影响指南》。后来, 国外学者已对利用气象卫星影像来估计悬空波导进行了初步探索^[11-12]。1994 年, 美国海军空战中心武器部将折射结构与天气图和卫星数据结合, 发现高空陷获层与反气旋主导的天气状况有关, 且云层和反气旋的特征与悬空波导的发生、高度和强度之间存在着显著的关联性^[13]。结合海洋大气边界层的形成特征和大气波导的影响因素, 悬空波导的发生与层积云密切相关。通过对全球沿海、岛屿和船舶上无线电测温仪获取的剖面折射数据进行统计分析, 发现悬空波导发生的昼夜变化与海洋层积云有关。基于此, 美国海军提出了卫星海洋悬空波导高度估算技术 (Satellite Marine-Layer/Elevated Duct Height technique, SMDH), 并指出在美国西海岸, 层积云的云顶温度和海表面温度是确定悬空波导高度的重要因子^[14-16]。此外, 基于悬空波导与云的定量关系, 美国还开发了东北太平洋悬

收稿日期: 2024-01-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41776029, 42306036); 国家自然科学基金专项项目 (62341133); 江苏省自然科学基金和面上项目 (BK20241963); 中国博士后科学基金面上项目 (2023M731396)。

作者简介: 成印河 (1980-), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋大气波导研究。E-mail: yinhe_9951@163.com

*通信作者: 乔文丽 (1991-), 女, 讲师, 博士, 主要从事海气界面相互作用研究。E-mail: qiaowl@jou.edu.cn

空波导评估系统。2000年,有研究利用SMDH对美国海军研究生院用物理模型方法反演的悬空波导高度进行了评估和验证,认为从卫星遥感数据中可以提取出悬空波导的有效信息,并指出物理模型比统计模型更具有优势^[17]。我国在此领域研究起步较晚。2019年,基于风云二号(FY-2G)静止气象卫星数据进行了我国沿海悬空波导个例反演研究^[18],指出了卫星反演悬空波导方法的可行性。2021年,国内学者通过全球定位系统(Global Position System, GPS)探空和卫星数据,总结了西太平洋各类低云和悬空波导特征参数之间的关系,发现两者在岛屿和海洋中的差别较大,实测的悬空波导高度底高普遍比云层高度低^[19]。

无论是美国海军发展的副热带海域SMDH还是物理模型技术,其基本原理均建立在天气学物理统计基础上。该原理认为,在层积云条件下,海洋边界层高度与悬空波导陷获层底高应处于同一高度。通过卫星遥感获得云顶温度和海表温度等参数,结合经验公式,可以推算出悬空波导陷获层底高,即悬空波导底高。然而,这一经验公式是基于东太平洋早期巡航数据并通过曲线拟合得出的云顶高度与温差之间的经验关系,其区域适用性有待验证。

南海是西太平洋最大的边缘海,是大气波导的高发区^[20],对我国的经济发展和国防建设起着重要作用,亟需开展悬空波导预测预报研究。本文拟利用南海GPS实测探空数据,针对其大气边界层顶的悬空波导开展定量研究,分析悬空波导的发生和形成机制,尝试建立悬空波导遥感反演定量关系式。该研究结果预期可为海上悬空波导遥感反演应用提供技术支撑。

1 数据与方法

1.1 数据

本文所用数据为1998年南海季风试验期间科考船“科学1号”与“实验3号”以及2006—2012年国家自然科学基金委开放航次期间观测的GPS探空数据。观测站位覆盖整个南海海域,每天于00时(世界时,下同)、06时、12时和18时4次释放探空气球,携带长峰或维萨拉气象传感器开展观测,采样

频率为1 s或2 s,主要观测参数为大气温度、气压、相对湿度、露点温度、海拔高度和风速等气象参数。“科学1号”和“实验3号”为定点观测站,其他站点为走航观测,具体的航次时间见表1。

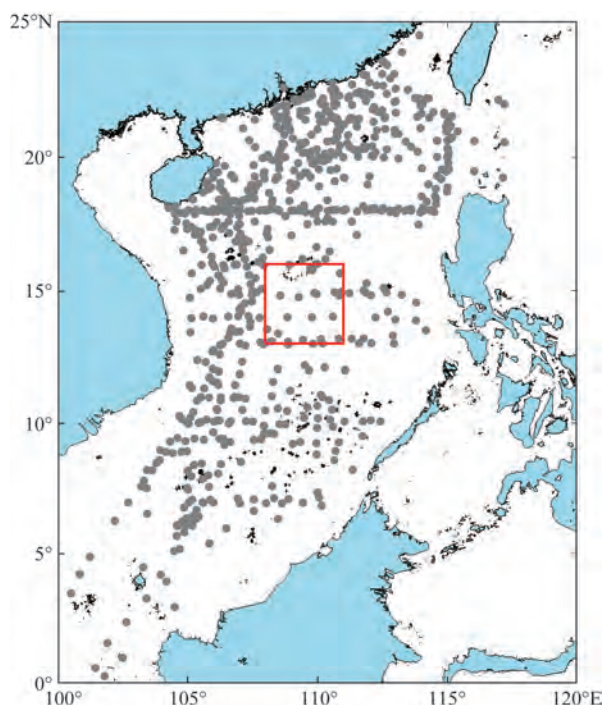
表1 GPS探空观测情况表

Tab.1 GPS sounding observations

观测站点	观测时间	廓线数量/个
科学1号	1998.5.2—6.24	152
实验3号	1998.5.6—6.23	152
走航观测	2006.9.8—9.28	40
	2006.11.26—12.16	28
	2007.5.14—5.23	23
	2007.6.2—6.20	41
	2007.8.13—9.29	39
	2008.3.16—3.20	15
	2008.6.30—7.14	28
	2008.8.16—9.4	60
	2009.6.9—7.5	40
	2009.9.1—9.19	53
	2010.4.14—4.18	13
	2010.5.19—5.27	30
	2010.9.2—9.20	54
	2010.10.26—11.11	37
	2011.4.2—4.6	16
	2011.5.10—5.13	23
	2012.6.17—7.3	34
	2012.8.9—9.5	69
	2012.9.6—9.22	62
	2012.9.30—10.26	63
合计		1 072

按照文献[6]的方法开展数据质量检验和预处理。首先,剔除在采样期间由于仪器故障、人为因素以及天气因素等引起的野点数据;其次,对数据进行质量控制,去除各个气象要素在气候学规定的阈值范围之外的观测值,如相对湿度范围为0~100%,大气温度为-80~45℃,露点温度需小于气温,观测高度需随时间逐渐上升,否则需舍弃该层

数据;最后,在保证数据完整性的条件下,对部分噪声数据进行五点三次多项式不等间距滑动平均和插值处理。经过处理后,本文获得了1 072个GPS探空廓线,主要包括随海拔高度变化的气温、气压和露点温度等气象要素。该数据点在整个南海区域的分布较为均匀(见图1),其中GPS探空数据为欧洲中期天气预报中心第五代再分析产品(European Centre of Medium - range Weather Forecasts Reanalysis v.5, ERA5)的南海中部典型海域(113°~116°E, 13°~16°N)的数据,用于验证拟合公式在南海海域的准确性。



注:红色矩形框所示为ERA5采样区域

图1 GPS探空观测站点分布

Fig.1 Distribution of GPS sounding observation sites

1.2 分析方法

1.2.1 大气波导诊断方法

对流层大气折射环境可用大气修正折射率指数(M)来描述,它是大气温度、水汽和气压的函数。对于微波以上频段的电磁波,计算公式为:

$$M = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) + 0.157z \quad (1)$$

式中: M 为大气修正折射率指数,是无量纲量,通常

记为 M 单位; T 为大气温度(单位:K); P 为大气压(单位:hPa); e 为水汽压(单位:hPa); z 为海拔高度(单位:m)。由于GPS探空数据不能直接获得水汽压参数,因此需要进行换算,计算公式为^[21]:

$$e = 6.11 \times \exp \left(19.7 \times \frac{T_d(\text{°C})}{T_d(\text{K})} \right) \quad (2)$$

式中: $T_d(\text{°C})$ 为大气的露点温度(单位:°C); $T_d(\text{K})$ 为大气绝对露点温度(单位:K); \exp 表示以自然常数 e 为底的指数函数。当大气层中大气修正折射率指数垂直梯度小于零时,即: $dM/dZ < 0$,该层大气发生大气波导。

1.2.2 海洋大气边界层高度诊断方法

目前国内外存在多种基于GPS探空数据获得海洋大气边界层高度的方法,如风速极值法、位温梯度法、干绝热法、罗氏法、湍流能量法和理查森数法等^[9]。有研究分析了不同方法对海洋大气边界层高度判定的适用性,认为利用理查森数法、气块法、位温梯度法研究海洋大气边界层高度较为合理,而相对湿度法和比湿梯度法的不确定性较大^[22]。本文采用位温梯度法作为判定海洋大气边界层高度的主要依据。位温气象参数计算公式为:

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (3)$$

式中: θ 为大气位温(单位:K); T 为大气温度(单位:K); P 为大气压(单位:hPa)。位温梯度采用中央差分^[23]方法计算,公式为:

$$\frac{\Delta \theta_i}{\Delta z_i} = \frac{\Delta \theta_{i+1} - \Delta \theta_{i-1}}{\Delta z_{i+1} - \Delta z_{i-1}} \quad (4)$$

式中: z_i 为第 i 层大气高度(单位:m); θ_i 为第 i 层高度处大气位温(单位:K);当垂向位温梯度最大时,即为海洋大气边界层高度。

2 结果分析

2.1 海洋大气边界层顶波导特征参数与边界层高度相关性

基于上述方法,经统计发现,在收集的1 072个GPS探空廓线数据中,有645个被诊断为在边界层顶发生波导,发生概率约为60%;同时也统计了其他大气波导特征参数和大气边界层高度,结果见表2。

表2 南海边界层波导特征参数及边界层高度统计

Tab.2 Duct characteristic parameters and boundary layer height statistics in the South China Sea

特征参数	波导发生频率/%	边界层高度/m	波导顶高/m	陷获层底高/m	陷获层厚度/m	波导厚度/m	波导强度/M
平均值	60	894	846	794	52	112	4.9

由表2可知,南海海洋大气边界层平均高度为894 m,而陷获层底高平均为794 m,两者相差100 m;海洋大气边界层高度也比波导顶高(846 m)高出近50 m。其他波导特征如平均陷获层厚度为52 m,平均波导强度为4.9 M单位,波导厚度为112 m,该波导厚度与美国卫星遥感波导技术使用统一的100 m接近。此外,针对未发生波导的427个GPS探空数据进行海洋大气边界层高度统计,平均高度为851 m,略低于发生波导的高度894 m。南海大气边界层总平均高度为877 m,这与经常发生大气波导的位置接近,说明海洋大气边界层顶是大气波导的高发区。

为了验证海洋大气边界层高度与大气波导特征参数之间的关系,对发生波导的GPS探空个例开展进一步分析。图2为海洋大气边界层高度与陷获层底高和波导顶高的散点分布图。由图2可知,海洋大气边界层高度与陷获层底高和顶高数据点大部分分布在 $y=x$ 附近,这表明大部分大气波导发生在海洋大气边界层顶附近。海洋大气边界层高度与陷获层底、波导顶高的相关系数分别为0.63和

0.64,这为建立海洋大气边界层波导高度与边界层高度之间的定量关系奠定了基础。海洋大气边界层顶经常发生逆温或湿度锐减,或同时发生两种情况,易导致边界层波导的形成。进一步研究发现,海洋大气边界层高度与波导强度和波导厚度之间的相关系数均未超过0.1,表明二者的定量关系不明显;然而,波导厚度大多集中在50~100 m,与波导强度呈现出明显的相关性,相关系数可达0.78。该结果表明波导强度与厚度具有正相关关系,波导越厚,其强度越强。

2.2 南海大气边界层顶波导形成机制

海洋大气边界层顶经常出现逆温或湿度锐减现象,这为悬空波导的形成提供了条件。为了进一步探究诱发南海大气边界层顶悬空波导的影响因素,本文分析了南海走航过程中观测的悬空波导形成机制。定义 ΔT 为悬空波导顶高与陷获层底高的大气温度之差, ΔQ 为悬空波导顶高与陷获层底高位置处相对湿度之差。表3为发生悬空波导时具体逆温和湿度锐减情况统计结果。由表3可知,在南海

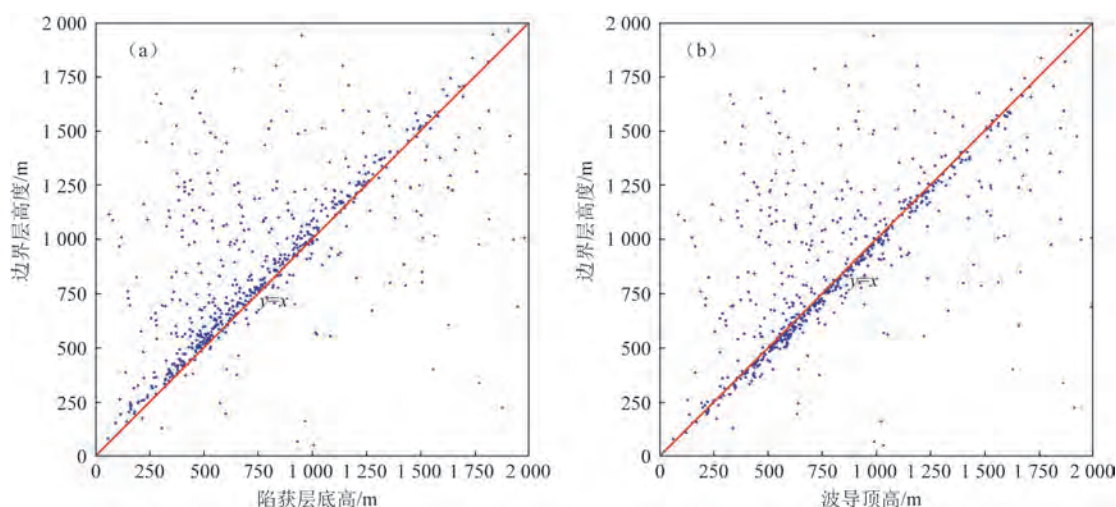


图2 南海边界层高度与陷获层底高(a)和波导顶高(b)散点分布

Fig.2 Scatter distribution of boundary layer height against trapped layer bottom height (a) and duct top height (b) in the South China Sea

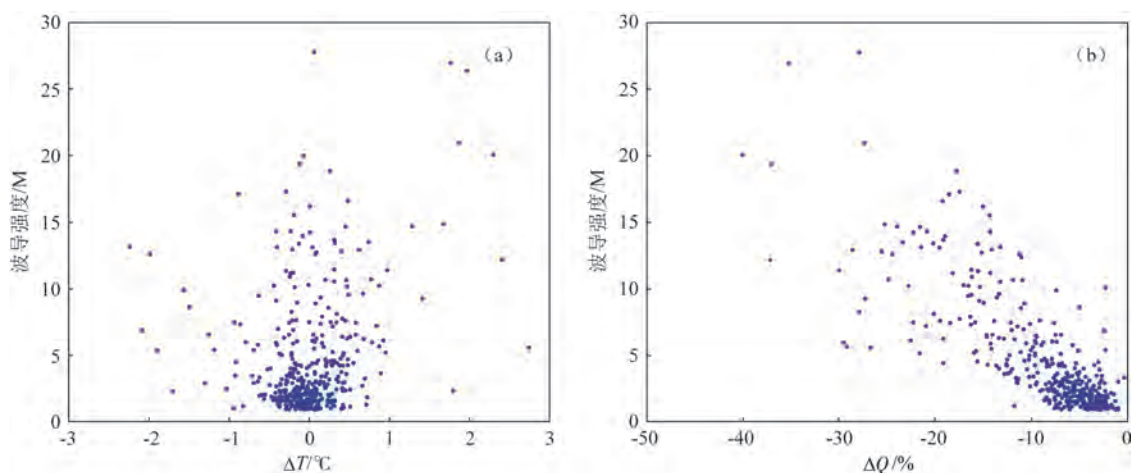
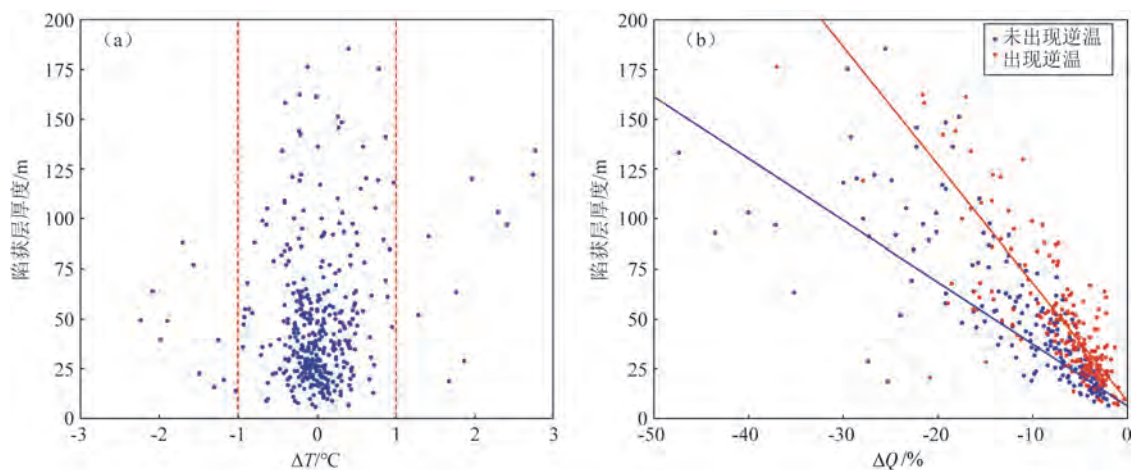
表3 海洋大气边界层顶波导发生时 ΔT 、 ΔQ 统计Tab.3 Statistics of ΔT and ΔQ on the top boundary layer during duct occurring period

ΔQ	ΔT		合计
	$\Delta T < 0$	$\Delta T \geq 0$	
$\Delta Q < 0$	202	207	409
$\Delta Q \geq 0$	0	6	6
合计	202	213	415

海走航观测数据中发生悬空波导的415个GPS探空个例中,湿度锐减($\Delta Q < 0$)的数据占98%以上,仅有6个探空数据的湿度略有增加($\Delta Q \geq 0$)。在湿度锐减情况下,51%伴随着逆温现象($\Delta T \geq 0$),即湿度锐减和逆温现象共存,这促进了南海边界层波导的

形成;其余49%则为正常的温度随着高度的增加而减小($\Delta T < 0$)。这表明,在南海边界层顶悬空波导发生时,湿度衰减项是主要因素,只有少量波导由大气逆温引起。

为了进一步分析南海悬空波导强度等特征参数与影响因素之间的关系,图3展示了波导强度与 ΔT 、 ΔQ 的散点图。从图3a可以看出,GPS探空数据点的 ΔT 较为集中地分布在 0°C 附近,呈半圆形向四周扩散,没有明显逆温现象。边界层顶发生波导的95%的数据点的 ΔT 绝对值均小于 1°C ,表明海洋大气边界层顶的逆温现象并不是引起悬空波导的主要原因。类似地,陷获层厚度与 ΔT 的散点分布也呈现出相似的趋势,大部分数据点分布在 0°C 附近,即使陷获层厚度超过 100 m , ΔT 的绝对值依旧分布

图3 南海边界层顶波导强度与 ΔT (a)和 ΔQ (b)的散点分布图Fig.3 Scatter plots of duct strength at the top of the boundary layer of South China Sea against ΔT (a) and ΔQ (b)图4 南海边界层顶陷获层厚度与 ΔT (a)和 ΔQ (b)的散点分布Fig.4 Scatter plot of trapper layer thickness against ΔT (a) and ΔQ (b) on the top boundary layer of South China Sea

在 1 °C 之内(见图 4a)。

图 3b 为波导强度与 ΔQ 的散点分布, ΔQ 的绝对值大部分集中在 15% 之内。 ΔQ 与悬空波导强度呈现出明显的正相关, 相关系数达到 0.83。为了更加定量地讨论 ΔQ 与陷获层厚度的关系, 分别按照出现逆温($\Delta T \geq 0$)和未出现逆温($\Delta T < 0$)两类情况进行线性拟合。拟合公式为:

$$\Delta Q_{\Delta T \geq 0} = -0.169\Delta D + 1.441 \quad (5)$$

$$\Delta Q_{\Delta T < 0} = -0.323\Delta D + 2.065 \quad (6)$$

式中: ΔD 为南海海洋大气边界层悬空波导陷获层厚度。从图 4b 可知, 在湿度锐减的条件下, 出现逆温(红线)与未出现逆温(蓝线)的线性拟合结果具有一定夹角, 即红线在上, 蓝线在下, 这表明在相同陷获层厚度下, 未出现逆温的相对湿度递减程度比出现逆温的更强。经计算, 当南海海洋大气边界层顶发生悬空波导时, 如果是由单一湿度锐减引起, 相对湿度递减率较大, 约为 0.323%/m; 如果逆温现象和湿度锐减同时存在, 相对湿度递减率约为 0.169%/m。这种量化关系可用于卫星遥感反演悬空波导技术中, 利用南海海洋大气边界层的层积云温度等信息可估算悬空波导的厚度或强度。

2.3 大气波导陷获层底高经验公式建立与验证

随着卫星遥感技术的迅速发展, 美国海军研究生院已开发出利用卫星遥感数据反演悬空波导信息并进行量化的技术。在这项技术中, 会采用一些局地经验统计关系。因此, 本文针对南海海洋大气边界层悬空波导, 尝试建立陷获层底高与海表面温度和云顶温度之差的经验关系, 并与美国卫星遥感反演悬空波导算法进行对比研究。美国的 SMDH 是根据加州大学洛杉矶分校 1949—1952 年在东太平洋观测的走航数据拟合而来, 其关系式^[24]为:

$$Z = -75.43 \times \Delta T + 2.105 \times \Delta T^2 \quad (7)$$

式中: Z 为陷获层底高(单位: m); ΔT 为陷获层底即云顶温度与海表面温度之差(单位: °C), 此式适用于 $\Delta T < 0$ 。当没有海表面温度观测值时, 取近海面气温代替。当 $\Delta T > 0$ 时, 即存在阴天或雾时, 卫星遥感反演陷获层底高直接指定在 50~100 m。由于本文使用的是 GPS 探空数据, 因此取陷获层底气温和近海面 10 m 的气温差进行应用验证, 图 5 为该差值随陷获层底高的分布情况。

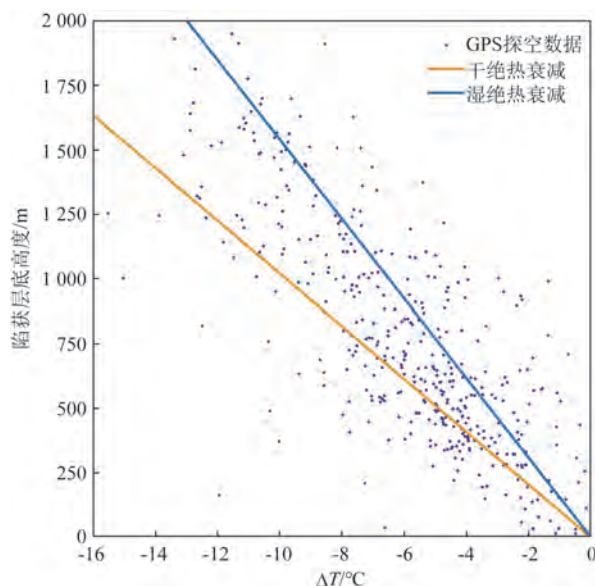


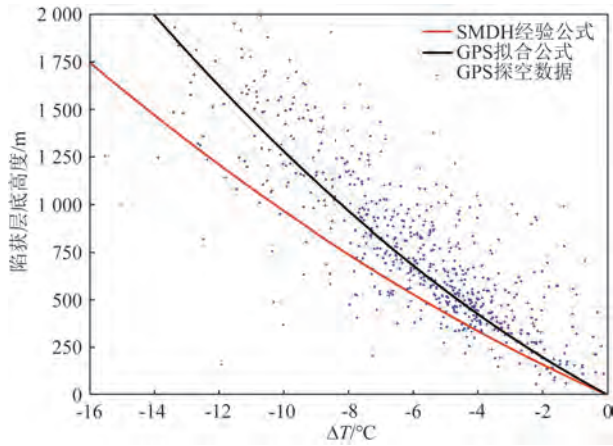
图 5 南海大气边界层陷获层高度与 ΔT 散点分布

Fig.5 Scatter plot of trapped-layer bottom height against ΔT in the South China Sea

干、湿绝热递减率是陷获层底高的重要参考参数。在干空气微团绝热上升过程中, 干绝热衰减率 Γ_{dry} 通常取常数 -9.8 °C/km; 湿绝热衰减率 Γ_{moist} 是饱和状态的湿空气绝热过程中温度随高度变化的速率, 通常取常数 -6.5 °C/km。两个常数廓线见图 5。然而在卫星遥感反演云的相关参数中, 该常数通常因研究区域而异^[25]。由图 5 可知, 在南海海洋大气边界层中, 只有少部分满足干绝热衰减率或湿绝热衰减率的假设。因此, 本研究利用 GPS 探空数据对陷获层高度进行一元二次多项式拟合, 公式为:

$$Z = -91.22 \times \Delta T + 3.655 \times \Delta T^2 + 36.2 \quad (8)$$

将式(8)与式(7)进行应用对比分析, 结果见图 6。由图可知, 由 SMDH 经验公式(即式(7))获得的陷获层底高值较拟合公式(8)的结果偏小。为了验证拟合公式在南海海域遥感反演悬空波导上的准确性与适应性, 本文选择 ERA5 数据对南海中部典型海域进行应用验证。ERA5 数据时间取为 2006 年 1—12 月, 范围见图 1 红色矩形框海域。提取该区域发生悬空波导时的陷获层底高、底高处气温和 10 m 海表面气温。在 ERA5 单层数据中先提取陷获层底高, 然后查找 ERA5 模式层数据中陷获层底高对应的气温数据, 因此需要利用线性插值处理获得对应

图6 陷获层底高与 ΔT 散点分布Fig.6 Scatter plot of trapped-layer bottom height against ΔT

的气温,同时匹配近海面10 m处的气温进行温差计算。经过匹配共获得81 946组再分析数据。利用

南海2006年发生悬空波导时的再分析数据对两个公式的应用进行验证,结果见图7。

由图7可知,基于式(7)和式(8)获得的陷获层底高值与ERA5再分析数据结果都有一定误差,均偏离 $y=x$ 线,这可能与所用的近海面10 m气温有关。从拟合斜率来看,基于南海GPS探空数据拟合公式获得的结果的斜率更贴近于1,达到了0.75,而使用SMDH经验公式的斜率仅为0.56。从数据散点分布情况同样可知,随着陷获层底高的增加,由SMDH经验公式得到的结果更加偏离ERA5数据结果。从误差统计结果可知,基于拟合公式得到的陷获层底高的平均绝对误差和均方根误差分别为83.9 m和107.5 m,均小于SMDH经验公式得到的204.1 m和230.0 m。因此基于南海GPS探空数据获得的新经验拟合公式更适用于南海悬空波导卫星遥感反演研究。

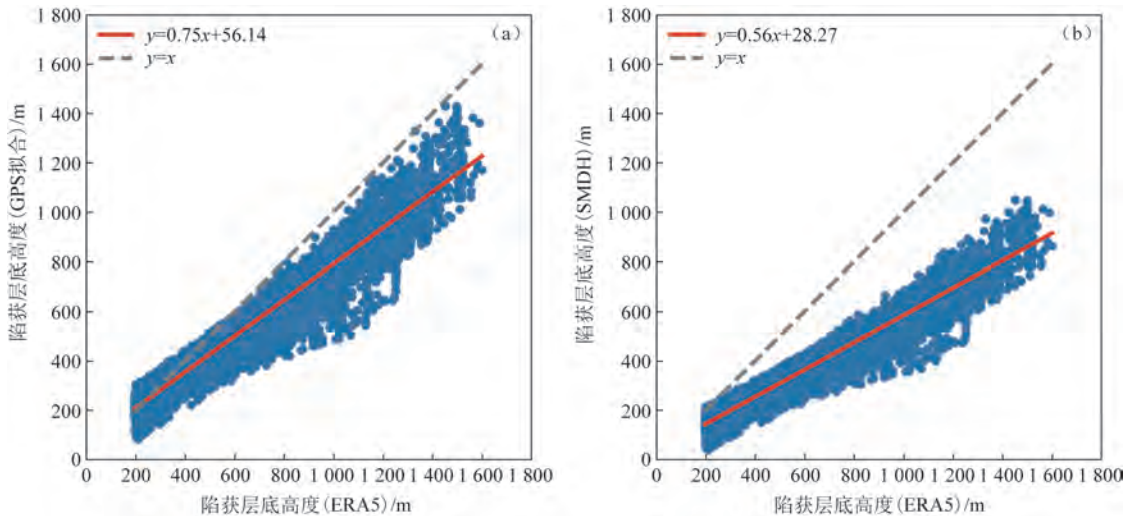


图7 基于GPS探空数据拟合公式(a)和SMDH经验公式(b)获得的陷获层底高与ERA5再分析数据的结果对比

Fig.7 Comparison of the results between the trapping layer bottom height of the fitting formula obtained from the GPS sounding data (a) and the SMDH empirical formula (b) with ERA5 reanalysis data

3 结论

本文基于南海GPS探空数据开展了海洋大气边界层的悬空波导与大气边界层高度之间关系的研究,同时分析了其发生机制。在此基础上建立了南海悬空波导陷获层底高的经验公式,并与美国发展的SMDH遥感反演经验公式进行比较分析。结论如下:

①南海海洋大气边界层顶悬空波导的发生频率在60%以上,海洋大气边界层顶平均高度为894 m,比波导顶高平均高度高48 m;平均波导强度为4.9 M单位,平均波导厚度为110 m,陷获层平均厚度为52 m。陷获层底高与海洋大气边界层顶高之间的相关系数为0.64,波导强度与波导厚度之间的相关系数为0.78,两者具有较强的正相关。

②98%的海洋大气边界层顶波导由湿度锐减

引起的,其中约51%伴随着逆温现象,相对湿度递减率变化较小,约为0.169%/m,无逆温情况下则数值较大,约为0.323%/m。波导强度与湿度锐减程度高度相关,相关系数为0.83。该结果表明南海海洋大气边界层顶的悬空波导绝大部分是由湿度随高度锐减引起的,很可能与层积云密切相关。

③由于南海海洋大气边界层高度与悬空波导陷获层底高相关,利用南海GPS探空数据建立了新的卫星遥感悬空波导反演经验公式,在南海的应用优于SMDH经验公式,误差更小,更接近于真实值。

已有研究指出,层积云顶通常存在的逆温和湿度随高度锐减现象是悬空波导存在的重要标志。本文基于层积云相关理论提出悬空波导遥感反演经验公式^[26],为进一步探索悬空波导卫星遥感反演方法提供了技术和理论支撑,其在南海的应用将值得进一步探讨。

参考文献:

- [1] BEAN B R, DUTTON E J. Radio meteorology[M]. New York: National Bureau of Economic Research, 1968: 7-8.
- [2] 潘中伟,刘成国,郭丽. 东南沿海波导结构的预报方法[J]. 电波科学学报, 1996, 11(3): 58-64.
PAN Z W, LIU C G, GUO L. The prediction of ducts in south-east coast of China[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996, 11(3): 58-64.
- [3] 白璐,张沛,吴振森,等. 海上对流层大气波导顶部电磁盲区研究[J]. 电波科学学报, 2016, 31(2): 278-283.
BAI L, ZHANG P, WU Z S, et al. Research of electromagnetic shadow zone in maritime tropospheric duct[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31(2): 278-283.
- [4] 焦林,张永刚. 大气波导条件下雷达电磁盲区的预报研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 34(6): 989-994.
JIAO L, ZHANG Y G. Prediction of the electromagnetic shadow zone under the atmospheric duct[J]. Journal of Xidian University, 2004, 34(6): 989-994.
- [5] 张玉生,郭相明,赵强,等. 大气波导的研究现状与思考[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 813-831.
ZHANG Y S, GUO X M, ZHAO Q, et al. Research status and thinking of atmospheric duct[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(6): 813-831.
- [6] 成印河,赵振维,张玉生. 季风期间南海低空大气波导统计分析[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 268-274.
CHENG Y H, ZHAO Z W, ZHANG Y S. Statistical analysis of the lower atmospheric ducts during monsoon period over the South China Sea[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 268-274.
- [7] 王海斌,张利军,王红光. 南海海区低空大气波导气候学分析[J]. 电波科学学报, 2019, 34(5): 633-642.
WANG H B, ZHANG L J, WANG H G. The climatological analysis of the lower atmospheric ducts in South China Sea[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34 (5): 633-642.
- [8] STULL R B. 边界层气象学导论[M]. 徐静琦,杨殿荣,译. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991.
STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. XU J Q, YANG D R, trans. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1991.
- [9] 张宏昇,张小曳,李倩惠,等. 大气边界层高度确定及应用研究进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 522-536.
ZHANG H S, ZHANG X Y, LI Q H, et al. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 522-536.
- [10] 戴福山. 大气波导及其军事应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2002.
DAI F S. Atmospheric duct and its military applications[M]. Beijing: PLA Press, 2002.
- [11] ROSENTHAL J S, HELVEY R A, LYONS S W, et al. Weather satellite and computer modeling approaches to assessing propagation over marine environments[C]//AGARD Conference Proceedings. 1989.
- [12] ROSENTHAL J S, HELVEY R A. Refractive assessments from satellite observations[C]//AGARD Conference Proceedings. 1992.
- [13] RICHTER J H. Structure, variability, and sensing of the coastal environment[C]//AGARD Conference Proceedings. 1995: 1.1-1.3.
- [14] LYONS S W. Satellite derived refractive duct height estimates[R]. California: Pacific Missile Test Center, 1985.
- [15] LYONS S W. SPADS automated duct height statistics[R]. California: Pacific Missile Test Center, 1985.
- [16] HELVEY R A, ROSENTHAL J S. Guidance for an expert system approach to elevated duct assessment over the northeastern Pacific Ocean[C]//Proceedings of IGARSS '94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE, 1994: 405-409.
- [17] JORDAN M S, DURKEE P A. Verification and validation of the Satellite Marine-Layer/Elevated Duct Height (SMDH) Technique [R]. Monterey: Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2000.
- [18] 郝晓静,李清亮,郭立新,等. 基于气象卫星数据的我国沿海悬空波导反演方法初步研究[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 600-605.
HAO X J, LI Q L, GUO L X, et al. An preliminary research on inversion method of elevated duct from meteorological satellite observation over Chinese regional seas[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(3): 600-605.
- [19] LI X D, SHENG L F, WANG W C. Elevated ducts and low clouds over the central western Pacific Ocean in winter based on GPS

- soundings and satellite observation[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, 20(2): 244-256.
- [20] CHENG Y, ZHA M L, YOU Z W, et al. Duct climatology over the South China Sea based on European Center for Medium Range Weather Forecast reanalysis data[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, 222: 105720.
- [21] 成印河, 钟权加, 周生启. 南海局地海域一次低空大气波导过程分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2012, 32(6):81-86.
- Cheng Y H, Zhong Q J, Zhou S Q. A process of the lower atmospheric ducts over the local area of South China Sea [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2012, 32(6):81-86.
- [22] 董议文, 张蕴斐, 张戈, 等. 不同边界层高度诊断方法对海洋大气边界层高度诊断的适用性研究[J]. *海洋预报*, 2021, 38(6): 64-72.
- DONG Y W, ZHANG Y F, ZHANG G, et al. Applicability of different boundary layer height diagnosis methods to the diagnosis of marine atmospheric boundary layer height[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(6): 64-72.
- [23] 宫庆龙, 刁一娜. 冷空气过程对黄海东海区域海洋大气边界层结构影响的个例分析[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(1): 51-61.
- GONG Q L, DIAO Y N. Case analysis of impact of cold air process on marine atmospheric boundary layer structure in Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(1): 51-61.
- [24] BRIDE III M B. Estimation of stratocumulus-topped boundary layer depth using sea surface and remotely sensed cloud-top temperatures[D]. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2000.
- [25] GARAY M J, DE SZOEKE P S, MORONEY C M. Comparison of marine stratocumulus cloud top heights in the southeastern Pacific retrieved from satellites with coincident ship-based observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D18): D18204.
- [26] ROSENTHAL J S. Inferring refractivity conditions from satellite imagery[R]. California: Pacific Missile Test Center, 1985.

Study on elevated duct prediction model of the South China Sea based on radiosonde data

CHENG Yinhe, ZHONG Wei, ZHAO Binbin, QIAO Wenli*, LI Xiaoran

(School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Analysis on the formation mechanism of elevated ducts and their significant correlation with the height of the marine atmospheric boundary layer (MABL) are carried out based on the Global Position System (GPS) sounding data from the South China Sea (SCS). The results show that the occurrence probability of elevated ducts in the South China Sea is approximately 60%, with an average trapping layer height of 786 m and MABL height of 894 m. The correlation coefficient between them is 0.64, demonstrating a strong correlation. The strength and thickness of elevated ducts exhibit no significant relationship with the MABL height. Approximately 98% of elevated ducts are caused by sharp decreases in humidity with altitude, and about 50% of them are accompanied by temperature inversions. Based on these findings, an empirical model is developed to estimate the top height of elevated ducts using the temperature difference between near-surface and trapping layer bottom temperatures. The model demonstrates superior performance in the South China Sea compared to the Satellite Marine-layer/Elevated Duct Height technique proposed by the United States Navy.

Key words: The South China Sea; elevated duct; marine atmospheric boundary layer; empirical model