

2024年南海海域大气波导发生规律及影响机制分析

王 露¹, 陈启萌^{1*}, 田 华¹, 武同元¹, 张 杰¹, 阎德平¹, 赵 健²

¹海军士官学校航海系, 安徽 蚌埠

²安徽省亳州市气象局, 安徽 亳州

收稿日期: 2025年6月25日; 录用日期: 2025年7月22日; 发布日期: 2025年7月29日

摘 要

利用ERA5再分析数据, 统计分析了南海及附近海域大气波导发生的时空分布特征, 并对其影响机制进行分析。结果表明该海域大气波导发生次数最多的月份是4月, 产生次数为34,526次, 占全年的19.30%; 产生次数最少的是12月, 共计4112次, 仅为全年总次数的2.30%。从空间分布上看, 春季整个海域几乎都有大气波导的产生, 其他季节的分布较为零散, 秋季多发生在南部和北部, 夏季和冬季以中部为主。从影响机制上主要分析了季风和副热带高压的影响, 在冬季风与夏季风转换期间, 海表上层会形成干燥的暖层, 覆盖在冷且潮湿的海面上, 形成了 $\partial T/\partial z > 0$ 的稳定层结。受副热带高压影响, 强烈的逆温下沉会阻止海面水汽上升, 水汽在低层长时间的停留, 会在近海面层形成 $\partial e/\partial z < 0$ 的水汽条件, 形成利于大气波导产生的大气层结。

关键词

大气波导, 南海, 规律统计, 机制分析, ERA5再分析数据

Analysis of Occurrence Patterns and Influencing Mechanism of Atmospheric Ducts in the South China Sea Areas in 2024

Lu Wang¹, Qimeng Chen^{1*}, Hua Tian¹, Tongyuan Wu¹, Jie Zhang¹, Deping Yan¹, Jian Zhao²

¹Department of Navigation, Naval Petty Officer Academy, Bengbu Anhui

²Bozhou Meteorological Bureau of Anhui Province, Bozhou Anhui

Received: Jun. 25th, 2025; accepted: Jul. 22nd, 2025; published: Jul. 29th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王露, 陈启萌, 田华, 武同元, 张杰, 阎德平, 赵健. 2024 年南海海域大气波导发生规律及影响机制分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 792-803. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144079

Abstract

Utilizing ERA5 reanalysis data, this study statistically analyzes the spatiotemporal distribution characteristics of atmospheric duct occurrences in the South China Sea and its adjacent areas and examines the influencing factors. The results show that the month with the highest frequency of atmospheric duct in this area is April, with 34,562 occurrences, accounting for 19.32% of the annual total; December has the fewest occurrences, totaling 4112, which is only 2.30% of the annual total. Spatially, atmospheric duct occurs almost throughout the entire sea area in spring, while their distributions is more scattered in other seasons. In autumn, they mostly occur in the southern and northern parts, while in summer and winter, they are mainly concentrated in the central part. Regarding influencing mechanisms, this study primarily analyzes the impacts of monsoons and the subtropical high-pressure system. During the transition period between the winter monsoon and the summer monsoon, a dry warm layer forms above the sea surface, overlaying the cold and moist sea surface, creating a stable stratification with $\partial T/\partial z > 0$. Influenced by the subtropical high-pressure, strong subsidence inversions prevent the rise of moisture from the sea surface. The prolonged retention of moisture in the lower layers leads to the formation of water vapor conditions with $\partial e/\partial z < 0$ near the sea surface, creating an atmospheric stratification conducive to the formation of atmospheric duct.

Keywords

Atmospheric Duct, South China Sea, Pattern Statistics, Mechanism Analysis, ERA5 Reanalysis Data

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着信息化装备的发展,海上大气环境中存在着大量的无线电系统,大气环境的复杂多变直接影响空间传播的电磁波路径损耗、改变电子系统的可靠性,制约装备的效能发挥,其中影响其效能的一个重要环境因素是大气波导[1]。大气波导是发生在对流层内的一种特殊效应,能改变电磁波传播轨迹,可以产生电磁波超视距传播和大气波导盲区等现象,同时也会造成雷达系统的测距和测高误差,在军事领域具有非常重要的应用价值[2]。

根据数据的来源不同,大气波导分布规律研究方法主要包括两类,一类是以飞行平台实测数据或无线电探空设备为数据源,如 Babin (1996) [3]利用直升机测量数据,分析了 Wallops 岛(弗吉尼亚州)表面波导的季节变化; Craig 等[4]利用无线电探空数据统计分析了欧洲大气折射率参数;成印河等[5]利用 1998 年南海季风试验(SCSMEX)中每天 4 次观测的高分辨探空数据进行了低空大气波导统计分析,初步揭示南海季风期间(5~6 月)低空大气波导分布规律;王海斌等[6]基于 2014~2016 年的探空数据对南海海域附近 8 个探空站数据进行了统计分析,获得了南海海区低空大气波导参数统计特征以及概率分布特征结果。另一种以再分析或大气数值预报模式垂向分层数据为数据源,研究区域大气波导分布规律,例如, von Engeln 等[7]利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA-40 数据研究了全球大气波导气候分布;Zhu 等[8]利用 MM3 数据分析了波斯湾海域大气波导的分布规律;成印河等[9]利用欧洲中尺度天气预报中心(ECMWF)提供的 30a 垂向上 60 层、空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 ERA-I 再分析数据,对中国近海低空大

气波导进行了统计分析,表明中国近海大气波导特征具有明显的月变化和区域分布特征。蔺发军等[10]在对海上大气波导的统计分析中得出大气波导的形成主要是由湿度随高度锐减或者温度随高度递增而形成的,或者两者同时发生而形成的一种大气层结。前人的研究结果表明不同海区呈现出不同的大气波导环境特性[11]-[14],每个海域都有其独特的波导特征[15]-[18]。如欧洲上空表面波导发生概率为 20% [4],地中海海域为 85% [19],而伊斯坦布尔海域夏季比较高为 31% [20]。国内大气波导统计也做过部分工作,相对集中在东海和南海[21] [22]。这些工作利用少量探空数据或再分析数据研究某些局部海域大气波导特征,取得了丰硕的成果。

南海是西太平洋的边缘海,南、北、西三面均被陆地包围,东面被由台湾岛、菲律宾群岛组成的岛链与北太平洋隔开[23],其内部存在强烈的涡旋活动,且受季风、地形、环流和太平洋扰动的影响[24]。其大气环境受大陆海岸线、季风及副热带高压等因素影响,已有的研究表明南海是低空大气波导的高发区[25]。作为西太平洋最大的半封闭海盆,南海海域陆架宽广,东部通过吕宋海峡与西北太平洋相连,其动力过程复杂,中尺度和次中尺度过程强盛[26],夏季以西南风为主,冬季以东北风为主[27]。本研究基于 ECMWF 提供的第五代全球气候再分析数据集(ERA5 再分析数据),对 2024 年南海及附近海域大气波导的发生进行了统计分析,得到了该海域大气波导的发生概率及空间分布统计,并对其影响机制进行了初步分析。

2. 数据与方法

2.1. 数据

ERA5 再分析数据是 ECMWF 于 2016 年推出的第五代全球大气再分析数据集(简称 ERA5 再分析数据),该数据涵盖 1979 年至今详细的大气、陆地和海洋气候变量。该数据水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向上分为 137 层,从地表到约 80 km 高度,包括全球所有区域,以及特定区域的高分辨率数据(如 ERA5-Land),数据类型有温度、湿度、风速、气压等[28]。结合前人对于大气波导高度分布的特征研究,本研究选用 2024 年 1 月 1 日~12 月 31 日的日数据,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向上选取 1000~750 hPa,间隔 25 hPa 每层,主要参数包括气温、比湿、气压和位势高度等。风场数据为 QuikSCAT 卫星遥感数据,西太平洋副热带高压指数来自国家气候中心。

2.2. 方法

由物理学知识可知,电磁波在真空中或物理性质均匀的介质中沿直线传播,但实际大气的物理性质不均匀,电磁波在其中传播时,路径会发生弯曲,其弯曲程度可用折射指数 n 表示,即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

c 表示电磁波在真空中传播的速度, v 表示在大气中传播的速度。理论研究表明 n 值的范围在 1.00025~1.0004 之间,数值较小且接近于 1,在研究应用中不太方便,所以引入大气折射率 N :

$$N = (1 - n) \times 10^6 \quad (2)$$

在微波和以下频段,大气折射率 N 可由常规气象要素确定:

$$N = \frac{A}{T} \left(P + \frac{Be}{T} \right) \quad (3)$$

T 为大气热力学温度,用 K 作单位, P 表示大气压强,单位为 hPa, e 表示水汽压,单位也为 hPa; A 、 B 为待定系数。对于波长为 2 cm~3 m 的电磁波而言, $A = 77.6$, $B = 4810$ [29]。

大气中 P 、 T 、 e 是随时间和空间变化的,因此 N 也是随时间和空间变化的函数。在对流层中, P 、

T 、 e 在水平方向变化相对较小,而在垂直方向变化较大,折射率的垂直变化远远大于水平方向的变化。实际研究中,为简化讨论,往往忽略水平变化,而只考虑垂直变化。

当电磁波传播距离较近时可以近似认为地球表面是平面,但若传播距离较远必须考虑地球曲率半径的影响,为将地球表面处理为平面,又定义一个代替大气折射率的量——大气修正折射率 M :

$$M = N + \frac{h}{r_e} \times 10^6 = N + 0.157z \quad (4)$$

式中 r_e 为平均地球半径(6371 km); z 为海拔高度(m)。

大气修正折射率的梯度与大气折射率梯度的关系为:

$$\frac{dM}{dz} = \frac{dN}{dz} + 0.157 \quad (5)$$

当 $\frac{dN}{dz} > 0$ 时电磁波的传播路径弯离地面向上,称为负折射;当 $\frac{dN}{dz} = 0$ 时,折射指数不随高度而改变,电磁波传播路径为直线,称为无折射;当 $\frac{dN}{dz} < 0$ 时,折射率指数随高度递减,传播路径弯向地面,称为正折射。而当 $\frac{dN}{dz} < -0.157$ 时,电磁波传播路径向下弯曲的曲率半径小于地球半径,此时电磁波会很快折向地面,再被地面反射后以足够的强度继续向前传播,而传到很远的距离,称为超折射。由于超折射的结果,电磁波可以在一定厚度的大气层中来回反射向前传播,形成大气波导现象。所以在实际研究中常以大气修正折射率的梯度判断大气波导产生,即 $\frac{dM}{dz} < 0$ 时出现大气波导。本研究中也以大气修正折射率为负值作为判定大气波导产生的标准。本文使用的是格点数据,一天一个点只有一次数据,一个月这个格点有 30 或 31 天(2 月份为 29 天),通过该点气温、气压和湿度算出该点 M 值,并经过插值算出 dM/dz ,然后取 dM/dz 的最小值,这样只要这一格点有一次 $dM/dz < 0$,就认为该点发生过大气波导,没发生过大气波导的点即是空白。

3. 大气波导发生规律的统计分析

3.1. 发生次数统计

利用 2024 年 1 月 1 日~12 月 31 日的大气温度、湿度、气压等垂向分层日数据,计算南海及附近海域大气波导的月产生次数,如图 1 所示。南海及附近海域大气波导发生次数随月份变化而不同,全年共产生大气波导次数为 178,976 次,其中发生次数最多的月份是 4 月份,产生次数为 34,526 次,占全年的 19.30%;其次是 5 月、10 月、2 月和 3 月,产生次数为 17,000 次左右,占比均接近 10%;产生次数最少的是 12 月份,共计 4112 次,仅为全年总次数的 2.30%。

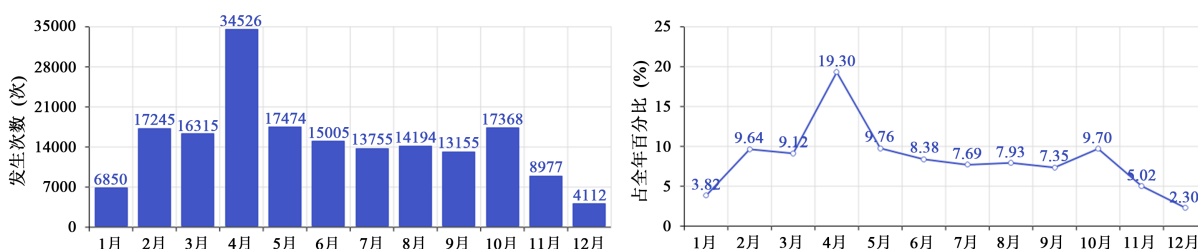


Figure 1. Monthly statistics of atmospheric ducts in the South China Sea and adjacent seas in 2024, with the left graph showing the occurrence frequency and the right graph showing the probability statistics

图 1. 2024 年南海及附近海域产生大气波导的月统计, 左图发生次数, 右图百分比统计

统计结果与成印河等[9]的研究结果极值月份(4月、12月)一致,但分布趋势略有不同。成印河等[9]利用 ERA-I 提供的 30a 再分析数据(1988~2017),分析中国近海大气波导发生概率,其中南海及附近海域 4 月份发生概率最高,12 月份最低。在其文章中指出南海及临近海域地处热带,终年气候比较稳定,发生大气波导的概率走势也比较平稳,概率在 17%~26%之间。但本研究的统计结果却略有不同,各月分布占比差别比较明显,以 11 月、12 月和 1 月三个月份占比分布为近 5%以下,4 月份占比分布最多,接近 20%,其它月份相对比较稳定,为 7%~10%之间。主要原因是成印河等[9]利用的数据一天 4 个时次,波导发生的月统计概率为当月发生的次数/当月的天数 * 4,而本文采用的统计方法为当月发生的次数/2024 年发生的总次数,虽然采用的方法有所不同,但都反映出了南海大气波导的分布规律,特别是极值月份的一致性,进一步说明了南海大气波导的月分布特征。而其它月份的分布趋势略有不同,主要是因为成印河等[9]利用的数据时间序列较长,统计规律具有普遍性,而本文只分析了 2024 年,月平均变化在符合极端月份的普遍情况下,又具有其年度变化特征,为此本文又对其季节分布情况做出分析。

由于南海地处低纬度地区,气候变化相对比较稳定,结合前人的研究,本文在计算大气波导发生次数的季节分布时,以 3 月、4 月、5 月代表春季,用 MAM 表示,6 月、7 月、8 月为夏季,用 JJA 季表示,9 月、10 月、11 月为秋季用 SON 表示,12 月、1 月、2 月为冬季,用 DJF 表示,统计结果如表 1 所示。

Table 1. Seasonal statistics of atmospheric ducts in the South China Sea and adjacent seas in 2024
表 1. 2024 年南海及附近海域产生大气波导的季节统计

季节	发生次数(次)	百分比(%)
春季(MAM)	68,315	38.17
夏季(JJA)	42,954	24.00
秋季(SON)	39,500	22.07
冬季(DJF)	28,207	15.76

由表中数据可以看出,南海及附近海域大气波导的发生次数具有明显的季节变化特征,从春季到冬季,出现次数依次减少。春季发生次数最多,为 68,315 次,占全年的 38.17%;冬季最少,不足春季的一半,共发生 28,207 次,占全年的 15.76%;夏季和秋季出现次数接近,在 40,000 次左右,占比超过 20%。本结论与前人研究比较一致,王华等[2]利用 2011~2016 年的 ERA-I 温、湿数据,并结合调查期间的低空探空火箭数据,得出中国近海大气波导发生概率最高的季节为春季(3~5 月),且与东亚季风之间有良好的对应关系。成印河等[5]根据 1998 年南海季风实验期间的观测数据,分析夏季风爆发对南海大气波导的影响,得出夏季风爆发前大气波导发生概率明显较高。

3.2. 分布规律

图 2~5 为南海大气波导的空间分布情况,颜色代表大气修正折射率的垂向梯度即 $\frac{dM}{dz}$ 的大小,颜色深浅表示 $\frac{dM}{dz}$ 的数值大小。由前文定义,当 $\frac{dM}{dz} < 0$ 即认为该区域产生大气波导,如图中色块标注区域;其中 $\frac{dM}{dz} > 0$ 表示不会产生大气波导,将该值赋空,如图中空白区域。

图 2 是春季大气波导的空间分布情况,分别为 3 月、4 月、5 月。由图可以看出,春季是整个南海大

气波导分布最广泛的季节,几乎整个南海都有大气波导的产生,其中以4月分布范围最大。3月分布情况与4月基本相同,但在大陆沿岸海域大气波导生成较少,如越南沿岸、海南岛以北、台湾海峡及台湾岛西南海域均很少生成,而到4月这些沿岸原本没有生成的海域也会产生大气波导。5月大气波导生成的范围有所减少,主要分布于 10°N 到 20°N 之间,南部和北部生成区域明显减少。整体来看,春季南海大气波导分布范围较大,只有在北部和南部的近岸海域没有大气波导产生。

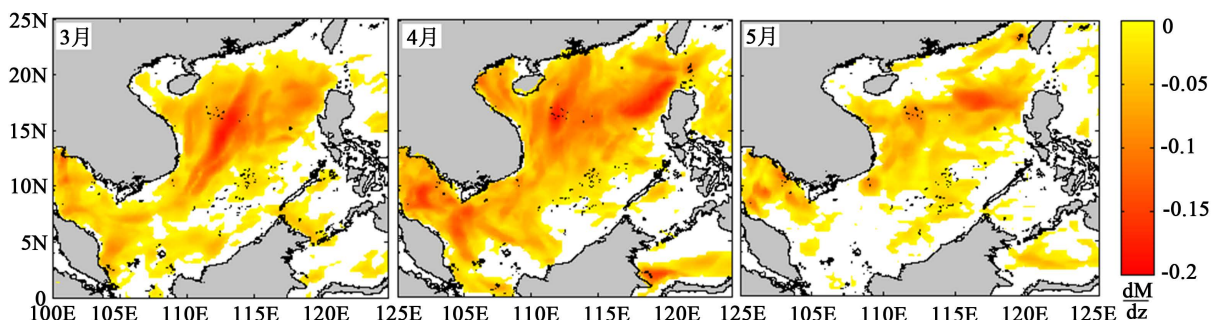


Figure 2. The spatial distribution of atmospheric ducts in the South China Sea and its surrounding seas during the spring of 2024 (March to May)

图 2. 2024 年春季(3~5 月)南海及周边海域大气波导空间分布

夏季大气波导分布范围比春季明显减少,如图 3 所示。6 月分布还是以中部为主,主要在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 之间,北部和南部分布相对较少;而到 7 月,中部产生区域减少,北部明显增多,主要分布在 20°N 附近,在吕宋海峡以西分布最多;南部分布范围不多,主要集中在 5°N 以南海域。8 月分布情况还是成南北结构,中部很少,特别是南部卡里马塔海峡分布较多,但整体都集中在 115°E 以西, 115°E 以东海域很少产生大气波导。整个夏季大气波导产生区域范围变化不大,但位置却从南海中部转变到北部与南部。

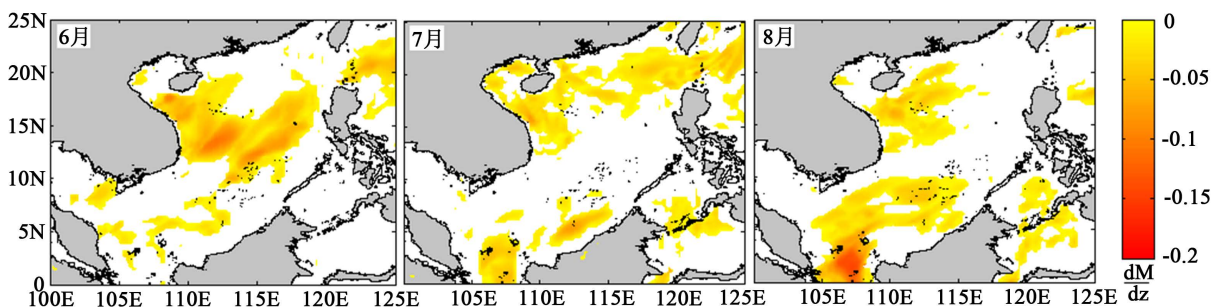


Figure 3. The spatial distribution of atmospheric ducts in the South China Sea and its surrounding seas during the summer of 2024 (June to August)

图 3. 2024 年夏季(6~8 月)南海及周边海域大气波导空间分布

秋季分布区域范围比夏季进一步减少,如图 4 所示。9 月主要分布在南部卡里马塔海峡以北海域,中部和北部分布区域较小且比较零散;10 月分布与 9 月类似,不同的是在东南位置的苏禄海和苏拉威西海大气波导产生较多,特别是苏拉威西海,整个海域都有大气波导的产生。11 月与以往月份均不相同,大气波导主要集中在南海北部,中部和南部几乎没有区域产生,秋季大气波导产生范围在逐渐缩小。

冬季大气波导产生的区域主要集中在 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 之间,以中部为主,如图 5 所示。其中 12 月大气波导产生范围全年最小,主要分布于菲律宾群岛以西和台湾海峡近岸海域;1 月分布情况与 12 月基本一致,范围略有增加;2 月生成区域向北增加,范围也有所扩大,整个冬季大气波导生成的范围呈扩大趋势。

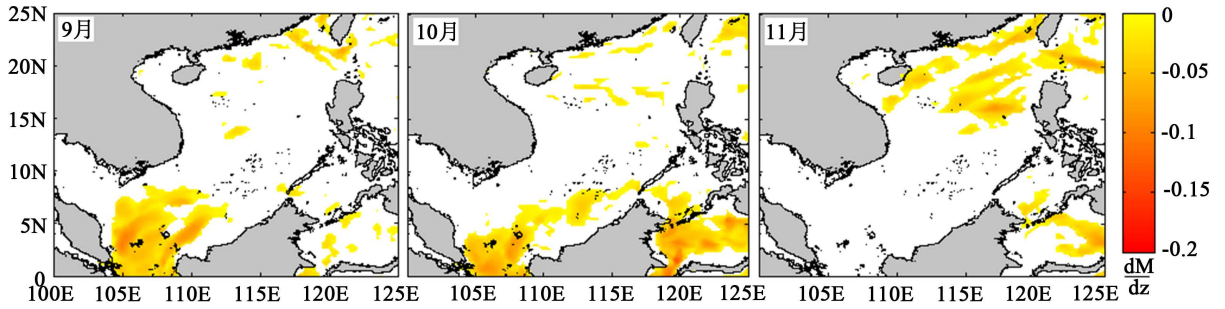


Figure 4. The spatial distribution of atmospheric ducts in the South China Sea and its surrounding seas during the Autumn of 2024 (September to November)

图 4. 2024 年秋季(9~11 月)南海及周边海域大气波导空间分布

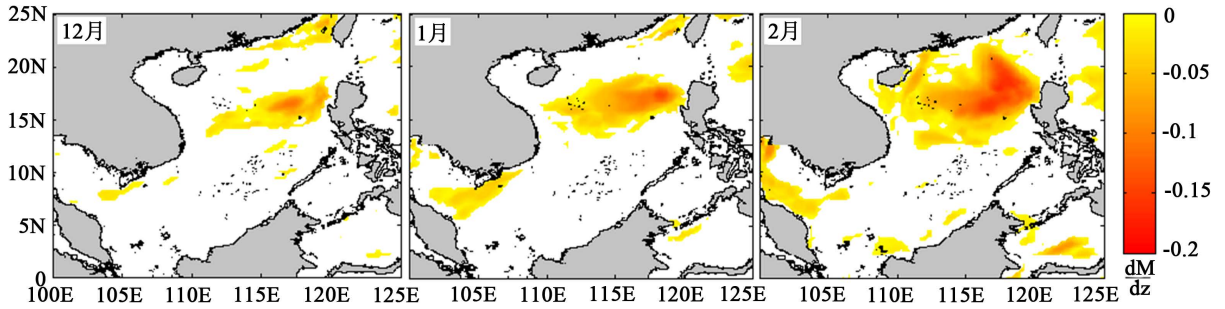


Figure 5. The spatial distribution of atmospheric ducts in the South China Sea and its surrounding seas during the Winter of 2024 (December to February)

图 5. 2024 年冬季(12~2 月)南海及周边海域大气波导空间分布

4. 影响机制分析

大气修正折射率 M 的表达式为:

$$M = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right) + 0.157z \quad (6)$$

将大气修正折射率 M 的表达式对高度 z 求导可得:

$$\frac{dM}{dz} = -\frac{77.6}{T^2} \left(P + \frac{9620e}{T} \right) \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{77.6}{T} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{373256}{T^2} \frac{\partial e}{\partial z} + 0.157 \quad (7)$$

大气波导发生在对流层大气边界层内,由上式可知,大气波导的产生主要受大气温度、湿度、气压的垂直梯度直接影响,其产生条件是 $\frac{dM}{dz} < 0$,气压随高度增大而降低,所以 $\frac{\partial P}{\partial z} < 0$ 恒成立,当 $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ 并且 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$ 时,容易满足 $\frac{dM}{dz} < 0$,即产生大气波导条件。因此本文在大气波导形成的物理机制探究上主要关注两个方面,一是气温形成条件即逆温过程,二是水汽形成条件,主要考虑蒸发过程。

$\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ 表示大气温度随高度升高而增大,即下层温度低,上层温度高,此时称为逆温结构,大气层结稳定,这与对流层低层下面温度高、上面温度低不同,所以要想产生大气波导,得有形成逆温结构的外界条件。而 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$ 表示水汽含量随高度升高而降低,对流层大气中水汽主要来自地球表面的蒸发,在陆地上由于蒸发量相对较小,所以水汽会随着高度的升高而减小,但垂直梯度相对不大;但在海洋上,

下垫面有源源不断的水汽供应, 由于对流作用, 在近海面层水汽会随着高度升高而增大, 导致 $\frac{\partial e}{\partial z} > 0$, 不利于大气波导的形成。所以海面要想满足大气波导形成的水汽条件, 应该是蒸发作用较强, 有源源不断的水汽供应, 但同时对流相对较弱, 让蒸发的水汽在下层的停留, 形成下层水汽含量多, 上层水汽含量少的水汽条件, 即满足 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$ 。而逆温结构层结较为稳定, 会抑制对流的发展, 也利于形成水汽随高度升高而降低水汽条件。

为了更好地验证理论推导, 我们选取了个例进行验证, 如图 6 所示, 为一次形成大气波导的气温和水汽条件, 蓝色、绿色和红色曲线分别为温度、湿度和大气修正折射率随高度的变化曲线。

图中虚线框 3 内为满足大气波导形成条件的区域, 可以看出只有当 $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ 并且 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$ 时, 才更容易满足 $\frac{dM}{dz} < 0$, 特别是 $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ 的条件, 对 $\frac{dM}{dz} < 0$ 的贡献较大。在 400 m 以下, 气温随高度升高而降低即 $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$, 水汽随高度升高而增大即 $\frac{\partial e}{\partial z} > 0$, 此时不满足大气波导的形成条件, 所以 $\frac{dM}{dz} > 0$, 如虚线框 1 所示。800~1000 m 范围内, 虽然满足水汽随高度升高而增大即 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$, 但由于气温随高度升高还是降低即 $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$, 所以仍然是 $\frac{dM}{dz} > 0$, 如虚线框 2 所示还是不满足大气波导形成条件。而到 1020~1100 m 范围内, 既满足 $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ 的气温条件, 并且 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$ 的水汽条件, 才形成了 $\frac{dM}{dz} < 0$ 的大气波导生成条件, 如虚线框 3 所示。

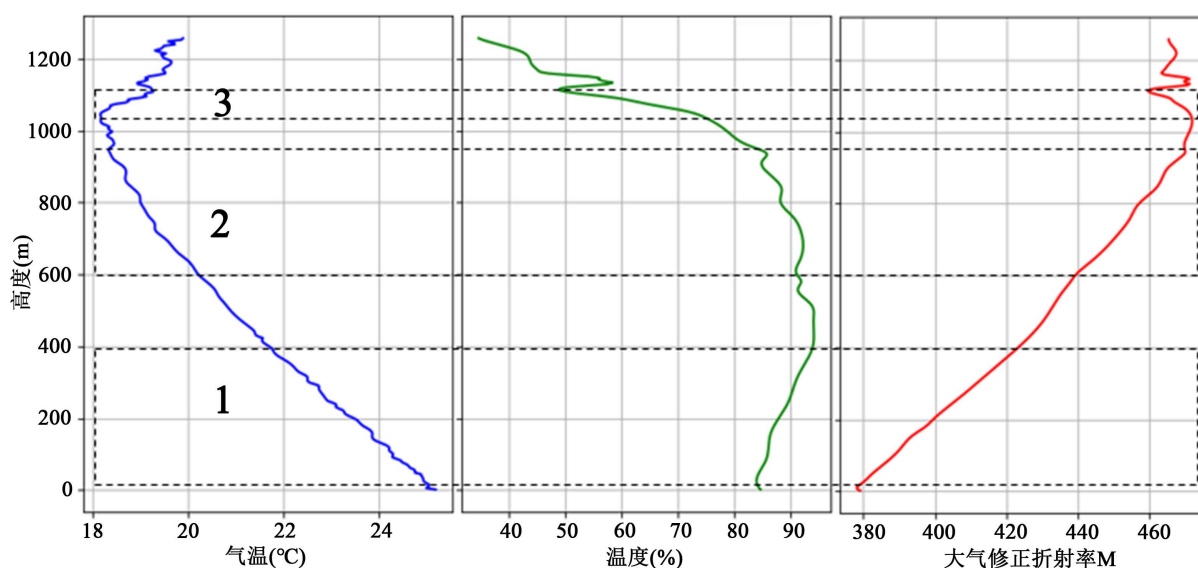


Figure 6. Case testing of atmospheric duct formation conditions

图 6. 大气波导形成条件个例验证

基于以上分析结合前人研究, 本文主要从影响南海逆温过程和蒸发过程的两个因素: 季风和西太平洋副热带高压分析春季南海大气波导产生较多的原因。

4.1. 季风作用

南海主要受亚洲季风影响, 如图 7 所示为南海 2024 年海面风场分布情况。以 1 月代表冬季, 4 月代

表春季, 7 月代表夏季, 10 月代表秋季。冬季主要盛行东北季风, 夏季盛行西南季风, 春季和秋季是盛行季风的转换过渡季节, 以偏东风为主, 且风力较弱。

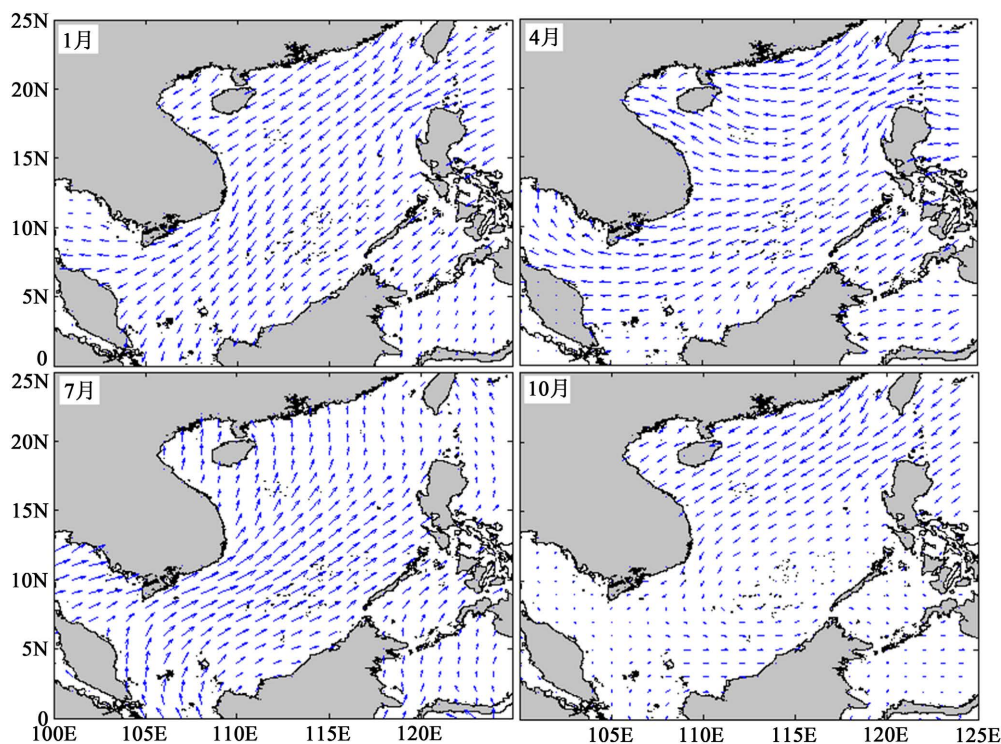


Figure 7. The distribution of sea surface wind fields in the South China Sea and its adjacent areas for January, April, July, and October of 2024

图 7. 2024 年南海及附近海域海面风场分布, 分别为 1 月、4 月、7 月和 10 月

冬季风期间, 主要盛行东北风, 从陆地吹向海洋, 风速相对较大, 不利于大气的停留, 没有足够时间与下垫面之间进行水汽交换。由于从高纬度陆地吹来, 本身空气比较干冷, 吹到温度相对较高的海面, 不会在近海面形成逆温层结构, 所以不利于大气波导的形成。

夏季风爆发后, 西南水汽输送增强, 将热带印度洋丰沛的水汽源源不断输送而来[30], 近海面水汽含量明显增大, 这种近海面的水汽压突变, 是由于夏季风的转化过程中的大环流背景发生改变, 大气低层的水汽由原来的东风水汽输送转变成充沛的西风水汽输送, 使得大气低层的水汽含量增大, 低层气流经过海洋加热湿润, 使低层大气温度较高、湿度较大, 但由于对流作用较强, 近海面混合均匀, 气温和水汽含量的梯度结构不明显, 也不利于大气波导的发生。

春季是东亚季风由冬季风向夏季风转换的过渡季节, 特别是夏季风爆发前, 西南气流北上加强, 海面因受短波辐射增加影响, 热力状态发生相应变化, 但由于海洋、大气热力性质不同, 海面升温会滞后于大气。暖湿气流平流到南海低温海面, 受海表冷却作用影响, 近海面层会形成逆温结构, 低层大气层结稳定, 对大气波导形成十分有利; 同时随着气温升高, 海面蒸发变强, 逆温层结阻止海面水汽上传, 在近海面造成水汽含量随高度升高而减小, 利于大气波导的产生。

4.2. 西太平洋副热带高压影响

西太平洋副热带高压具有明显的南北位移特征[31], 如图 8 中所示为 2024 年 1~12 月西太平洋副热带高压脊线位置变化图。位置指数以 500 hPa 图上副高脊线的位置和走向表示副高的位置和走向, 脊线

的确定以高空东西风速的 0 线为准，脊线的南北移动表示副高的南退和北进。

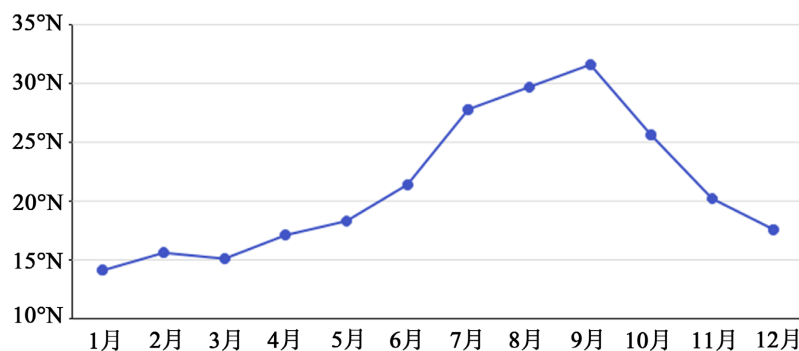


Figure 8. Monthly variations of the Western Pacific Subtropical Ridge Line position from January to December 2024
图 8. 2024 年 1~12 月西太平洋副热带高压脊线位置逐月变化

副高脊线在 1~3 月处于 15°N 附近，随季节变暖，脊线位置缓慢向北移动，6 月脊线第一次“北跳”，越过 20°N 线，7 月出现第二次“北跳”，脊线迅速越过 25°N 以北，9 月跨过 30°N 线，到达最北。随着副高势力减弱，9 月以后开始自北向南迅速撤退，11 月以后再次跳到 20°N 以南地区，结束一年周期的季节性南北位移。

3~5 月，副高脊线位于 15°~20°N 之间，随季节变暖，脊线缓慢北移，南海大部分海域处于副热带高压脊区控制，南部海域处于脊线南侧，脊线南侧风向为东南风，空气中水汽充足。低层大气辐散，空气在动力作用下作下沉运动，在海表上层会形成干燥的暖层，覆盖在冷且潮湿的海面上，形成 $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ ，即大气温度随高度升高而增大的稳定层结。北部海域处于脊线北侧控制，北侧由于天气形势影响，风向为西南风，引陆风入海，可以在海面形成平流逆温。强烈的逆温层结会阻止海面水汽上升，加之此时夏季风还未爆发，南海处于冬季风到夏季风的转换期，海面会形成有利于水汽停留的背景场，在近海面层容易形成 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$ ，即水汽含量随高度升高而降低的水汽条件，两者共同作用，进一步促进春季南海大气波导的形成。

5. 结束语

利用 ECMWF 提供的 2024 年 1 月 1 日~12 月 31 日的 ERA5 再分析数据，分析了南海及附近海域大气波导发生的时空分布特征，并对其影响因素进行分析，得出以下结论：

(1) 从时间分布看，发生概率随月份变化而不同，发生次数最多的月份是 4 月，占全年的 19.30%；产生次数最少的是 12 月，仅为全年总次数的 2.30%。且发生次数占比具有季节变化特征，从春季到冬季，占比依次减少，春季发生次数最多，占全年的 38.17%；冬季最少，占全年的 15.76%；夏季和秋季出现次数接近，占比超过 20%。

(2) 从空间分布上看，随季节不同，大气波导发生的区域也不相同。春季整个海域几乎都有大气波导的产生，秋季多发生在南部和北部，夏季和冬季以中部为主。

(3) 春季是南海季风由冬季风向夏季风转换的过渡季节，同时南海海面被副热带高压西部脊区控制，导致低层大气下沉辐散，在海表上层会形成干燥的暖层，覆盖在冷且潮湿的海面上，形成 $\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ 的逆温稳定层结。强烈的逆温下沉会阻止海面水汽上升，形成有利于水汽停留的背景场，在近海面层形成 $\frac{\partial e}{\partial z} < 0$ 的水汽条件，进而利于大气波导的产生。

基金项目

海军士官学校科研发展基金(2024)。

参考文献

- [1] 汪文杰, 许佳立, 黄贤青, 等. 基于海洋安全的大气波导观测方法研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(1): 112-122.
- [2] 王华, 马贲, 焦林, 等. 基于 ECMWF 再分析数据的大气波导分布规律研究[J]. 气象学报, 2021, 79(3): 521-530.
- [3] Babin, S.M. (1996) Surface Duct Height Distributions for Wallops Island, Virginia, 1985-1994. *Journal of Applied Meteorology*, **35**, 86-93. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0086:sdhdfw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0086:sdhdfw>2.0.co;2)
- [4] Craig, K.H. and Hayton, T.G. (1995) Climatic Mapping of Refractivity Parameters from Radiosonde Data. *Proceeding Conference 567 on Propagation Assessment in Coastal Environments*, Bremerhaven, February 1995, 43-1-43-14.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] von Engeln, A., Nedoluha, G. and Teixeira, J. (2003) An Analysis of the Frequency and Distribution of Ducting Events in Simulated Radio Occultation Measurements Based on ECMWF Fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108**, Article 4669. <https://doi.org/10.1029/2002jd003170>
- [8] Zhu, M. and Atkinson, B.W. (2005) Simulated Climatology of Atmospheric Ducts over the Persian Gulf. *Boundary-Layer Meteorology*, **115**, 433-452. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-1428-1>
- [9] 成印河, 杨欣坤, 张玉生, 等. 基于 ECMWF 数据的中国近海低空波导特征研究[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(1): 86-96.
- [10] 蔺发军, 刘成国, 成思. 海上大气波导的统计分析[J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 64-68.
- [11] 成印河, 周生启, 王东晓, 等. 夏季风爆发对南海南北部低空大气波导的影响[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(3): 1-8.
- [12] 黄立峰, 刘成国, 姜明波, 等. 黄海海域低空大气波导发生概率和特征量统计分析[J]. 电波科学学报, 2022, 37(6): 1080-1088.
- [13] 成印河, 游志伟, 张玉生, 等. ERA-I 数据在南海大气折射率环境中的应用评估[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 885-895.
- [14] Zhao, X., Wang, D., Huang, S., Huang, K. and Chen, J. (2013) Statistical Estimations of Atmospheric Duct over the South China Sea and the Tropical Eastern Indian Ocean. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 2794-2797. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5942-8>
- [15] Cheng, Y., Zhou, S., Wang, D., Lu, Y. and Yao, J. (2015) Statistical Characteristics of the Surface Ducts over the South China Sea from GPS Radiosonde Data. *Acta Oceanologica Sinica*, **34**, 63-70. <https://doi.org/10.1007/s13131-015-0749-x>
- [16] Cheng, Y., Zhou, S., Wang, D., Lu, Y., Huang, K., Yao, J., et al. (2015) Observed Characteristics of Atmospheric Ducts over the South China Sea in Autumn. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **34**, 619-628. <https://doi.org/10.1007/s00343-016-4275-2>
- [17] 李晓东, 盛立芳, 邱静怡, 等. 西太平洋中南部冬季悬空波导统计分析及其成因初探[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(2): 51-56.
- [18] 郝晓静, 李清亮, 郭立新, 等. 北极大气波导时空分布研究[J]. 极地研究, 2018, 30(4): 349-359.
- [19] Bech, J., Sairouni, A., Codina, B., Lorente, J. and Bebbington, D. (2000) Weather Radar Anaprop Conditions at a Mediterranean Coastal Site. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **25**, 829-832. [https://doi.org/10.1016/s1464-1909\(00\)00110-6](https://doi.org/10.1016/s1464-1909(00)00110-6)
- [20] Mentés, Ş. and Kaymaz, Z. (2007) Investigation of Surface Duct Conditions over Istanbul, Turkey. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **46**, 318-337. <https://doi.org/10.1175/jam2452.1>
- [21] 刘成国, 黄际英, 江长荫. 东南沿海对流层大气波导结构的出现规律[J]. 电波科学学报, 2002, 17(5): 509-513.
- [22] Ding, J., Fei, J., Huang, X., Cheng, X. and Hu, X. (2013) Observational Occurrence of Tropical Cyclone Ducts from GPS Dropsonde Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 1221-1236. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-11-0256.1>
- [23] 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等. 南海中尺度涡研究进展[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(2): 131-158.
- [24] 曾飞鸿, 谢玲玲, 吴开明, 等. 南海西北陆坡次表层异常反气旋涡声传播特征研究[J]. 海洋学报, 2024, 46(8):

- 19-36.
- [25] 张钜一, 丁佳奇, 赵小峰. 基于 GPS 探空数据的南海海域大气波导特征分析[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 841-846.
- [26] 黄家辉, 谢玲玲, 李强, 等. eSQG 方法在南海垂向流速诊断中的应用研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(12): 55-69.
- [27] 周晨, 李君益, 郑全安, 等. 南海北部冬季陆架波特征[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(3): 89-97.
- [28] 朱志凡, 曹洁, 邱晓滨, 等. EARS 资料在天津沿海海陆风特征分析中的适用性评估[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(3): 37-49.
- [29] 孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [30] 朱茵霖, 杨熙昊, 翁翹楚, 等. 全球变暖背景下南海夏季风变化特征[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(3): 60-67.
- [31] 聂高臻, 王慧. 2023 年夏季海洋天气评述[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(4): 110-112.