

西太平洋蒸发波导的时空统计规律研究^{*}

杨坤德[†] 马远良 史 阳

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2009 年 3 月 7 日收到, 2009 年 5 月 5 日收到修改稿)

海洋蒸发波导自然现象对近海面电磁波的传播有重要影响, 获取大面积海域蒸发波导的长时间统计分布规律, 对于海上雷达、通信、制导等电磁系统的设计与应用, 具有重要意义. 针对现有单点局部观测方法的缺点, 建立了基于美国环境预报中心再分析数据的大面积海域蒸发波导统计特性计算方法, 利用太平洋气象浮标数据、北部湾海岛气象观测数据对分析方法的正确性进行了验证. 利用该分析方法和最近 18 年的美国环境预报中心再分析数据, 重点研究了西太平洋蒸发波导的统计规律, 获得了蒸发波导高度在不同海域、不同月份的分布特性, 建立了空间分辨率约为 $1.875^\circ \times 1.9^\circ$ 的蒸发波导特性数据库, 与国外现有的 $10^\circ \times 10^\circ$ 数据库相比, 不仅分辨率提高约 28 倍, 而且精度更高.

关键词: 蒸发波导, 再分析数据, 电磁波, 统计特性

PACC: 9210, 9260

1. 引言

利用雷达对海面目标探测时, 往往出现雷达的实际探测距离大于雷达视距的现象, 此现象是由于出现大气波导所造成的^[1-7]. 作为大气波导的重要组成部分, 蒸发波导是海洋大气中特有的一种波导形式. 其产生机理是: 由于海面水汽蒸发, 使得海面上几十米高度范围内的大气湿度随高度锐减, 大气折射指数随高度的增加而减小, 出现负梯度, 当此负梯度达到一定量级, 使得微波向下折射的曲率大于海面曲率时, 信号能量就被陷获在波导中, 出现超视距传播现象. 有了波导效应之后, 波阵面的扩展由球面扩展转变为近似柱面扩展, 不仅信号传播的路径损失大大减小, 而且可以伴随着波导轴沿地球表面的弯曲, 向前传播到很远的距离.

蒸发波导高度是表征波导强度的重要物理量, 也是确定蒸发波导对海上电子设备影响的一个重要参量. 通常确定蒸发波导高度的方法有: 直接测量法^[8,9]、雷达杂波反演法^[5]、模型预测法^[8-13]等. 直接测量法通过观测气象要素沿高度的分布, 利用经验公式计算得到折射率剖面, 或者直接通过折射率仪

进行剖面测量, 雷达杂波反演法利用雷达接收的海杂波进行蒸发波导的反演, 模型预测法是广泛使用的方法, 它主要通过现场单点测量近海面空气温度、湿度、大气压、风速、海水表面温度等气象参数来预测局部海域的波导高度. 然而, 以上方法都有共同的局限性, 只能获取某实验地点、单条测线或局部海区的蒸发波导特性, 空间覆盖率很低, 实验时间有限, 很难大面积、长时间地获得波导特性的统计规律.

美国目前采用的波导特性数据库, 主要来自志愿商船于 1970—1984 年采集的 15 年气象数据, 并利用 PJ(Paulus-Jeske)模型^[11]计算获得了全球大部分海域的统计规律, 其空间分辨率为 $10^\circ \times 10^\circ$ (马斯顿方格), 并嵌入到高级折射效应预报软件 AREPS(advanced refraction effects prediction system)中作为环境数据库模块^[14]. 其主要缺点有: 1) 因为海上实际气象条件在经纬度 10° 范围内差别很大, 因此该数据库的空间格点范围太大, 分辨率很低, 很难满足实际应用; 2) 数据主要来于商船经历的航线附近, 不能有效地表示 $10^\circ \times 10^\circ$ 的海域范围; 3) 由于近二十年全球气候发生明显变化, 该数据库采用的数据资源陈旧, 对于最近几年以及未来的变化, 需要采用更新的气象数据进行统计规律研究; 4) 该数据库采用 80 年

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40774119)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-08-0455)、西北工业大学科技创新基金和西北工业大学基础研究基金资助的课题.

[†] E-mail: ykdzym@nwpu.edu.cn

代创立的预测模型计算蒸发波导高度,近年来的研究表明,该模型存在较大的误差.

因此,不管是现场单点测量,还是采用美国已有的波导特性数据库,都存在明显的缺点,远远不能满足在海上电磁系统设计和水面电子对抗中,对大范围海区电磁环境时空分布特性的紧迫需求.

本文基于最新的 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)^[15]全球气象同化数据库中的地球表面气象参数,建立了分析大面积海域蒸发波导统计特性的方法,通过海上现场实际测量数据进行了方法的评估与验证,形成了空间分辨率更高的全球海洋蒸发波导统计规律数据库,并据此对西太平洋海域蒸发波导特性进行了深入的统计分析,得出对海上雷达与通信等电磁系统有价值的结论.充分利用国际 NCEP 气象要素同化数据库,开展西太平洋蒸发波导特性的时空统计规律研究,国内外还未见报道.

2. 海洋蒸发波导统计特性分析的方法

2.1. 基本概念

电磁波在大气中的传播轨迹由空气折射指数 n 的水平梯度和垂直梯度确定,折射指数 n 定义为电磁波的波阵面在真空中的传播速度 c 与在空气中的传播速度 v 之比.根据斯涅尔折射定律,电磁波射线向 n 值更大的区域弯曲或折射.由于在对流层中折射指数 $n \approx 1$,在地球表面的典型值为 1.0003,因此折射率 N 为^[11],

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

对于频率在 100 MHz—100 GHz 范围内的电磁波而言, N 可用以下经验公式表示^[11]:

$$N = \frac{77.6P}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (2)$$

其中 T 为空气绝对温度(单位为 K), P 为大气压(单位为 hPa), e 为水汽压(单位为 hPa).有时为了方便,将地球半径加以考虑,使用修正折射率 M 来描述,其表达式为^[8,9]

$$M = N + 10^6 \times z/a = N + 0.157z, \quad (3)$$

其中 M 是无量纲的,其数值通常称为 M 单位. a 为地球半径 6.378×10^6 m, z 为离海面的高度.在海上,标准大气的修正折射率垂直梯度通常为 0.118 M/m.修正折射率的垂直梯度 dM/dz 决定了波导的性

质.当 $dM/dz = 0$ 时,电磁波射线的曲率等于地球曲率,电磁波沿平行于地球表面的方向传播;当 $dM/dz > 0$ 时,电磁波向远离地球的方向传播;当 $dM/dz < 0$ 时,电磁波向地球表面弯曲,由此形成所谓的波导.

2.2. 蒸发波导的预测模型

由于蒸发波导位于海洋大气边界层的近地层内,其形成受海-气界面微气象条件的影响和制约,在这里湍流通量和压力随高度变化很小.因此,对于蒸发波导高度和蒸发波导内大气折射率剖面的确定,只能根据海洋大气边界层近地层相似理论,利用海上观测实验及数值计算模型来确定.蒸发波导预测模型是目前获取蒸发波导高度及其修正折射率垂直分布的主要方法,它以大气边界层相似理论 MOS (Monin-Obukhov similarity) 为基础,使用某一已知高度上的气象参数和海表温度的平均测量值进行计算.目前,国内外存在若干蒸发波导模型,如 BYC (Babin-Young-Carton) 模型^[8,9]、NPS (Naval Postgraduate School) 模型^[9,10]、PJ (Paulus-Jeske) 模型^[11]、MGB (Musson-Gauthier-Bruth) 模型^[12]、伪折射率模型^[13]等.这些模型对相似理论的应用方法存在不同,因此适用条件和计算结果有所差异.

PJ 模型因其算法简单且计算速度快,在海上舰船中应用广泛,自 1978 年起就作为美国海军的业务化运行模型.但 PJ 模型的主要缺点是:它假设位折射率与位温度、位湿度等气象参数一样满足大气边界层相似理论,然而这只是在不稳定和中性条件下成立,对稳定条件,位折射率并不满足 MOS 理论,当气海温差大于 1 °C 时,PJ 模型认为是测量误差造成的而对此进行了修正.事实上在沿海区域,由于海陆交互作用,气海温差大于零的情况经常发生,PJ 在稳定条件下的计算结果可能会发生错误;同时,PJ 没有考虑在低风速下 MOS 理论存在的误差,并且 PJ 模型采用的一些参数来源于陆地测量的结果.因此,PJ 模型在不稳定条件下的结果往往比实际的波导高度高,而在稳定条件下,不能给出正确的结果.

Babin^[8,9]对 PJ、NPS、BYC、MGB、NWA、NRL 等模型进行了仔细的理论分析和浮标数据验证评估,认为 NPS 模型和 BYC 模型是目前估计蒸发波导高度和折射率剖面的最佳模型,这两种模型的基本原理一样,区别是内部特定函数的选择和波导高度的确定方式不同.BYC 模型是通过求导方式直接获得蒸

发波导高度,而 NPS 模型是获得温度、湿度、大气压的剖面后,计算出蒸发波导折射率剖面,再利用最小值的位置确定波导高度.相比较而言,NPS 模型具有更强的稳定性,因为当波导高度为零,或者当波导高度超过边界层很高时,BYC 模型通过求导方式获得的波导高度都为零,将出现错误.因此,本文选择 NPS 模型来开展海上蒸发波导的统计规律研究.

在海上近地层内,由于大气和海面之间的相互作用十分剧烈,因而使该层大气的运动呈明显的湍流性质.由于在该层内大气压的垂直梯度和科里奥利力可以被忽略,所以可以使用近地层的 MOS 理论.MOS 陈述了近地层大气物理量垂直梯度与尺度参数之间的关系,它是一个估计近表面折射率剖面的有力工具.

在近地层中,假设大气水平均匀,动量的湍流通量守恒,且敏热和潜伏热不随高度变化,那么一个守恒标量 S 的垂直梯度可以按照相似理论表示为^[11]

$$\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S_*}{\kappa z} \phi_s \left(\frac{z}{L} \right), \quad (4)$$

其中, z 是海拔高度(单位 m), S_* 是标量 S 的尺度参数, κ 是 von Karman 常数(通常取为 0.4), L 是 Monin-Obukhov 长度, ϕ_s 是通过经验确定的该标量的稳定性函数.标量 S 通常为风速、位温和比湿.

(4) 式从 $z = z_0$ 处开始积分,则有^[11]

$$S(z) - S_0 = \frac{S_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \phi_s \left(\frac{z}{L} \right) \right], \quad (5)$$

式中, z_0 是表面粗糙度长度(通常取为 0.00015), S_0 是 S 在 z_0 处的值.由(5)式可以得到 S 在近地层中任意高度处的值.

在对流层中, T 、 P 和 e 的测量对于计算折射率 N 很重要,然而在进行近地表气象测量时会受到湍流的影响,因此只能使用模拟湍流传输机制并推测折射率的方法来代替对瞬时折射率的直接测量.MOS 理论恰好模拟了这种湍流传输机制.在(4)和(5)式中,通常 S 分别取为风速 u_* 、位温 θ 和比湿 q ,相应的尺度参数分别为 u_* 、 θ_* 和 q_* .位温是指当空气包的压力达到参考压力 P_0 (通常为 1000 hPa)的值时空气包的温度^[9,10],即

$$\theta = T(P_0/P)^{R/C_p}, \quad (6)$$

式中, T 是温度(单位 K), P 为大气压, $R/C_p = 0.286$.比湿 q 与水汽压 e 的函数关系为^[9,10]

$$e = \frac{qP}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)q}, \quad (7)$$

式中 ε 为常数 0.62197.

为了确定相应的尺度参数,以往 PJ、MGB 等模型依赖于 Richardson 数和 Obukhov 长度之间的经验关系,其中许多经验关系是通过陆上试验获得的,对于海洋的情况,试验较少,采用经验关系的目的是简化计算,符合当时计算能力较低的要求.NPS 模型的核心,是采用长期海上调查所获得的海气通量整体算法 COARE(coupled ocean-atmosphere response experiment 耦合海洋大气响应实验)^[16],所用的经验关系均来自大洋试验,该算法广泛应用于边界层领域,并得到了大量的试验检验.本文采用最新发布的 COARE3.0 算法来进行海表层尺度参数 u_* 、 θ_* 和 q_* 的计算,之后采用以下公式计算温度和湿度剖面^[9,10]:

$$T(z) = T_{\text{sea}} + \frac{\theta_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_{0\theta}} \right) - \phi_T(\zeta) \right] - \Gamma_d z, \quad (8)$$

$$q(z) = q_{\text{sea}} + \frac{q_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_{0q}} \right) - \phi_T(\zeta) \right], \quad (9)$$

式中, z 为在表面层中的任一高度, T_{sea} 为海表温度, Γ_d 为干绝热递减率,约等于 0.00976 K/m, q_{sea} 为在海表处的比湿,函数 ϕ 在稳定和不稳定条件下选择不同的形式^[9]. $\zeta = z/L$ 称为 Monin-Obukhov 参数,用来表示大气稳定度.中性时, $L \rightarrow \infty$, $\zeta = 0$;稳定时, $L > 0$, $\zeta > 0$, ζ 越大, L 越小,表示大气越稳定;不稳定时, $L < 0$, $\zeta < 0$, $|\zeta|$ 越大, $|L|$ 越小,表示大气越不稳定.

为了确定折射率垂直剖面,还需要知道大气压随高度变化的函数表达式.大气压剖面是通过联立流体静力学方程和理想气体定律并积分得到的^[10],即

$$P(z_2) = P(z_1) \exp \left(\frac{g(z_1 - z_2)}{R \bar{T}_v} \right), \quad (10)$$

式中 z_1 为观测高度, z_2 为表面层中的任一高度, g 为重力加速度(约 9.8 m/s²), R 为气体常数, $\bar{T}_v$ 为在高度 z_1 和 z_2 处的虚温的平均值,即 $\bar{T}_v = [T_v(z_1) + T_v(z_2)]/2$.

将(8)–(10)式获得的温度、湿度和大气压剖面代入(2)–(3)式,就得到了修正折射率剖面.假设以下条件:空气温度 28 ℃、海水温度 30 ℃、风速 5 m/s、相对湿度 75%和大气压 1000 hPa,则利用 NPS 模型计算得到的蒸发波导修正折射率剖面如图 1 所示.剖面最小点的高度称为波导高度,剖面最小值与海面修正折射率之差称为波导强度.

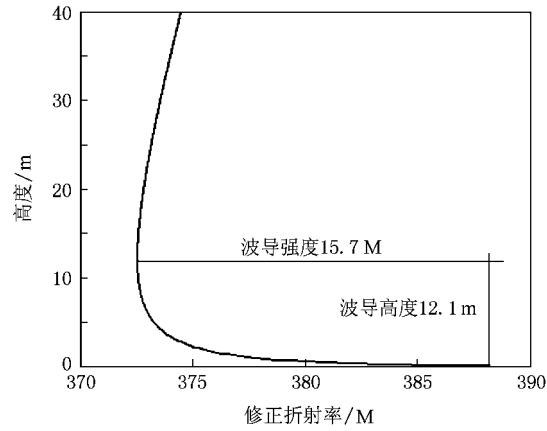


图 1 蒸发波导的修正折射率图

2.3. 蒸发波导高度对气象要素的敏感性分析

影响蒸发波导高度的气象要素主要包括近海面的空气温度、相对湿度、风速风向、气海温差和大气压等.通过蒸发波导预测模型的仿真分析表明,大气压和风向对蒸发波导高度和强度直接影响很小.作者课题组开展的多次海上试验表明,风向改变有时会引起空气温度和相对湿度的显著变化,从而间接影响波导高度,因此下面利用 NPS 模型,主要分析空气温度、相对湿度、风速和气海温差对蒸发波导高度的影响.

图 2 表示的是各气象要素对蒸发波导的影响,图中横轴为空气与海水表面温度之差,纵轴为利用预测模型计算的蒸发波导高度.当气海温差为小于、等于和大于 0℃时,分别称为不稳定条件、中性条件和稳定条件.在气海温差大于 0℃的稳定条件下,由于靠近海面的热量将被海水吸收,容易形成自下而上的逆温层,再加上相对湿度若随高度存在梯度,由(2)式可知,折射率剖面将沿高度减小,预测的波导高度很高.为了进行有效地统计,将超过 40 m 的波导高度限制为 40 m.

图 2(a)(b)(c)(d)是固定海水表面温度 $t_s = 26^\circ\text{C}$ 的情况下,改变气海温差、相对湿度和风速的分析结果.在不稳定条件下,相对湿度越低、风速越高,则蒸发波导的高度就越大;在稳定条件下,在较低风速时,当相对湿度小于 85%,则波导高度很快达到 40 m,但随着风速的加大,波导高度降低,而且湿度较大的情况下波导降低更快.

图 2(e)(f)(g)(h)为固定风速 $u = 5\text{ m/s}$ 的情况下,改变气海温差、相对湿度和海表温度的分析

结果.在不稳定条件下,相对湿度越低、海表温度越高,则蒸发波导的高度就越大;在稳定条件下,在较低相对湿度时,则波导高度很快达到 40 m,但随着相对湿度的加大,波导高度降低,而且海表温度较低的情况下波导降低更快.

图 2(i)(j)(k)(l)为固定相对湿度 $H_r = 80\%$ 的情况下,改变气海温差、海表温度和风速的分析结果.在不稳定条件下,海表温度越高、风速越高,则蒸发波导的高度就越大;在稳定条件下,在较高海表温度时,则波导高度很快达到 40 m,但随着海表温度的降低,波导高度降低,而且风速较大的情况下波导降低更快.

从上述敏感性分析可看出一般的规律:在气海温差小于 0℃的不稳定条件下,波导高度随气海温差的变化较小;空气与海水的温度越高,风速越大,相对湿度越低,越有利于海水的蒸发,从而形成较强的蒸发波导;而在气海温差大于 0℃的稳定条件下,波导高度随气海温差的变化较大,波导高度与气象参数的关系更复杂,在较低相对湿度、较低风速和较高气海温度的情况下,容易形成波导高度很高的情况.

从图 2 也可以看出,在稳定条件下,波导高度对气象参数的敏感性强于不稳定条件,同时也说明气象测量仪器的误差将在稳定条件下带来更大的误差.

2.4. 蒸发波导统计分析的数据源

为了进行大面积海洋蒸发波导的统计特性研究,气象各要素数据源必须是大面积、长时间、同步获取的.单点现场气象测量(岸边、岛上或船上)、雷达海杂波反演等方法仅限于局部海域的短期观测,很难获得大面积海域的长期时空统计特性.随着人类航天技术的快速飞跃发展,利用海洋卫星的遥感仪器,可以获得高精度、全天候、全天时、长时间、全球或半球的海洋动力环境参数,如蒸发波导特性研究需要的海水表面温度、波浪高度、空气温度、空气湿度、大气压、风向与风速等环境要素,这是蒸发波导研究发展的新方向.然而,由于卫星种类和运行轨道的不同,目前还很难同步获得蒸发波导预测所需的近海面气象要素.例如,美国的 QuickSCAT 卫星,可以高精度地测量全球海洋表面的风场数据,当风速范围是 3—30 m/s 时,其风速的均方误差约为 2 m/s,风向的均方误差约为 20°,空间分辨率为 25 km(经过后处理可达 12.5 km),并可覆盖全球 90% 的海

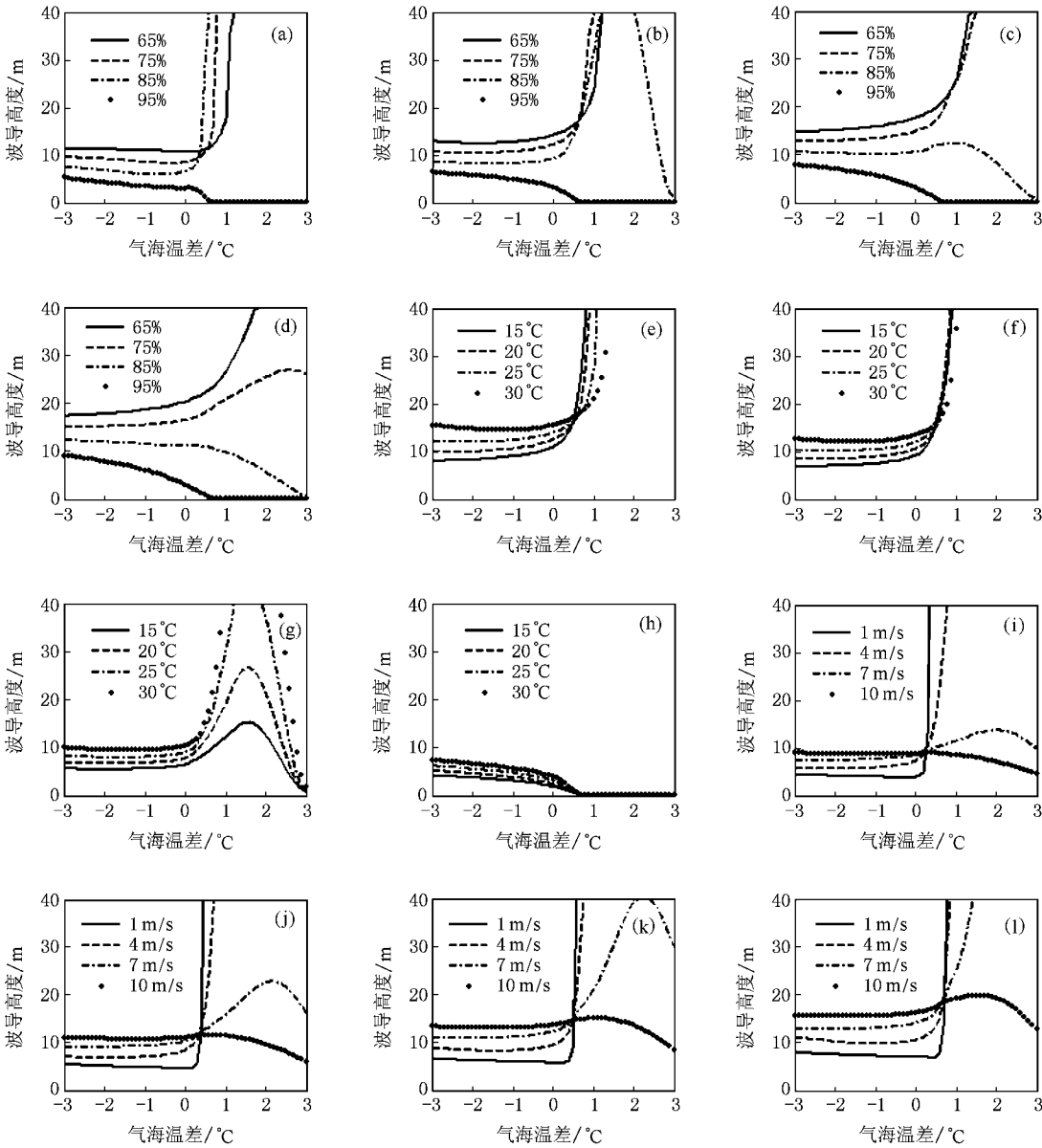


图2 利用波导预测模型分析气象要素的敏感性 (a) $t_s = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u = 2.5\text{ m/s}$;(b) $t_s = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u = 5\text{ m/s}$;(c) $t_s = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u = 7.5\text{ m/s}$;(d) $t_s = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u = 10\text{ m/s}$;(e) $u = 5\text{ m/s}$, $H_r = 65\%$;(f) $u = 5\text{ m/s}$, $H_r = 75\%$;(g) $u = 5\text{ m/s}$, $H_r = 85\%$;(h) $u = 5\text{ m/s}$, $H_r = 95\%$;(i) $H_r = 80\%$, $t_s = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$;(j) $H_r = 80\%$, $t_s = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;(k) $H_r = 80\%$, $t_s = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$;(l) $H_r = 80\%$, $t_s = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

洋,但其显著缺点是每天扫描固定海域仅为一次,且存在观测盲区,远远不能满足蒸发波导预测的要求。

采用美国环境预测中心 NCEP 公开发布的再分析数据^[15],为获得大面积海域蒸发波导的时空统计特性,提供了一种新的途径。该数据库是由美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)协作,对来源于地面、船舶、无线电探空气球、飞机、卫星等的气象观测资料进行同化处理后,研制出的全球气象资料数据库。NCEP 月平均再分析资料可靠性强,作为目前用于气候分析时间序列最长的分

析资料,广泛应用于气候诊断分析,并且在一些全球、区域气候变化的模拟和预测中,作为气候模式的初始场和驱动场资料,用来检验模拟结果。NCEP 给出了从 1948 年至今的间隔 6 h 的全球气象再分析资料,地理空间覆盖为东西经 180° ,北纬 88.543° 至南纬 88.543° ,共计 192×94 个高斯格点,经度分辨率为 1.875° ,纬度分辨率随纬度变化,大约为 1.9° ,水平距离分辨率约为 210 km。NCEP/NCAR 计划于近期发布更高分辨率的全球耦合大气海洋再分析数据,大气参数的分辨率可达 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,海洋参数的分

分辨率可达 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. 因此, NCEP/NCAR 包括了监测蒸发波导的必要气象参数, 为研究蒸发波导的监测方法、获取大范围海域的蒸发波导统计特性, 提供了十分有利的条件.

如前所述, 蒸发波导高度主要决定于近海面的空气温度、相对湿度、风速和海表面温度四个要素, 在利用 NCEP 中的高斯表面类再分析数据进行蒸发波导统计规律研究中, 数据选择方法如下: 1) 空气温度: 采用离地面或海面 2 m 高度处的再分析温度数据; 2) 海表温度: 采用再分析表面温度, 它与实际海表面温度的误差一般小于 1°C ; 3) 相对湿度: 利用离地面或海面 2 m 高度处的再分析比湿数据, 计算出水汽压, 通过空气温度获得饱和水汽压后, 计算出相对湿度; 4) 风速风向: 采用离地面或海面 10 m 高度处的再分析风场数据.

2.5. 利用 NCEP 数据估计蒸发波导的可信度评估

为了验证基于 NCEP 数据分析蒸发波导特性的可信度, 首先采用海上气象浮标的长期观测数据进行评估. 由于浮标数据直接在海上进行测量, 不受陆地和船舶的影响, 一般被认为是海洋气象参数的标准. 本文采用美国国家浮标数据中心 (NDBC: National Data Buoy Center) 发布的太平洋气象浮标数据, 来评估 NCEP 数据估计蒸发波导的可信度. 该数据来自美国海洋大气局 NOAA 的热带大气海洋浮标阵列, 它由分布在赤道太平洋的将近 70 个固定浮标组成, 测量海表温度、气温、相对湿度、海面风场、温跃层厚度、上层海流变化等. 选取最靠近我国海域的浮标 WM052006 (北纬 8° , 东经 165°) 来分析, 数据样本从 1989 年 7 月 16 日至 2008 年 12 月 31 日, 取日平均数据后进行月平均分析.

选择 NCEP 中最接近浮标位置的格点数据 (1990—2008 年的再分析月平均数据) 与浮标数据进行比较, 如图 3 所示. NCEP 格点与浮标的距离为 63 km. 图 3(a) 给出了气象参数月平均值的比较, 可以看出 NCEP 和浮标获得的气象数据比较一致. 图 3(b) 给出了蒸发波导高度月平均值的比较结果, 二者也比较一致, 最大差别约为 1 m. 其中在 1—3 月, 利用浮标数据估计的蒸发波导高度比 NCEP 数据高, 主要原因是浮标获得的气温稍高, 湿度稍低.

为了评估 NCEP 数据在近海的可靠性, 图 4 给出了 NCEP 数据与北部湾涠洲岛测量数据的对比结果. 北部湾测量点位于涠洲岛的东北角海滩上

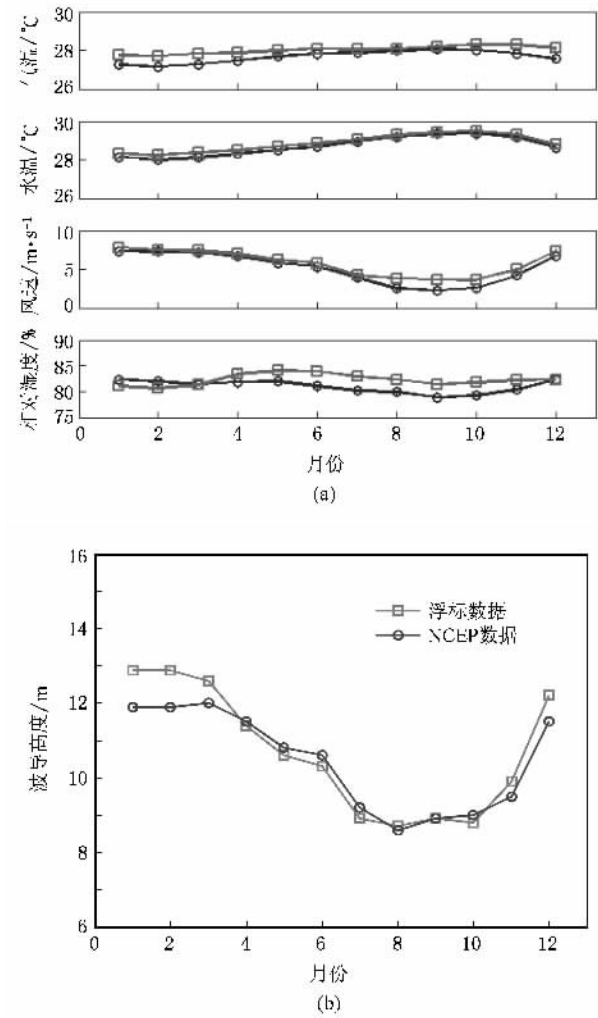


图3 NCEP数据与浮标数据的对比 (a)气象参数随月份的变化 (b)蒸发波导高度随月份的变化

(21.0575°N , 109.1392°E), 气象传感器(温湿度、风向风速)的布放高度离海面约 6 m, 自动气象站每隔 10 s 进行数据的采集与存储. 选择与 NCEP 数据具有相同时刻的 10 天涠洲岛数据来进行比较. NCEP 的网格点坐标为 19.9997°N , 108.75°E , 与涠洲岛测量点的距离为 124.3 km. 图 4 中第 1 个数据点的时间为 8 点, 第 2 个为 14 点, 依次类推. 从图 4 中可以看出: 1) NCEP 网格点的温度值与涠洲岛测量值比较接近, 但由于 NCEP 网格点的纬度比涠洲岛偏南 1° , 因此空气温度在白天 8 点、14 点的值比涠洲岛测量值高大约 2°C , 而在晚上 20 点和 2 点, 二者比较一致; 2) 两种数据获得相对湿度的变化趋势一致, 但其大小有一定差异, 与温度的差别一样, 也是在白天 8 点和 14 点的差别大, 而在晚上 20 点和 2 点的差别较小, 说明两个位置由于纬度上的差别, 使得在白天的温

度和相对湿度差别较大 3)风速的测量值受陆地影响偏差较大,由于涠洲岛测量点在岛的东北部,风速风向传感器的高度离海面仅约 6 m,受到周围树林、山坡的影响,对东北风、东风、东南风的测量精度较高,而对于北风、西北风、西风、西南风,则测量值普遍偏低. 通过与美国 QuickScat 卫星风场数据的比较,NCEP 的风场数据比较精确.

通过与太平洋海上浮标数据、北部湾涠洲岛数据的比较说明,采用 NCEP 数据来分析我国周边海域的蒸发波导特性,具有较高的可信度. 同时也说明,在海岛上测量气象参数将会带来一定误差(尤其是风速),从而对蒸发波导的预测带来较大误差.

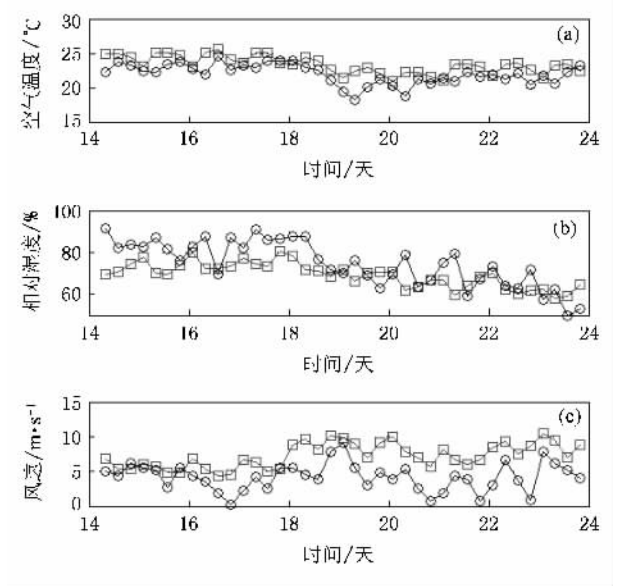


图 4 NCEP 数据与北部湾涠洲岛测量数据的对比. 带圆圈线为涠洲岛测量数据,带方框线为 NCEP 数据.(a) 空气温度 (b) 相对湿度 (c) 风速

3. 西太平洋蒸发波导的统计特性分析

3.1. 西太平洋蒸发波导的统计特性

分析中采用了 NCEP 库中 1990—2008 年的再分析数据,首先将某年某日某时刻的气象数据输入到 NPS 预测模型中,计算出蒸发波导高度样本,然后利用统计方法获得不同海域的月平均分布规律.

图 5 中粗线构成的方格是按照 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 分辨率形成的马斯顿方格,根据这种划分,我国周边主要海域的蒸发波导特性只能用黄海、东海、南海北部、南海中部、南海南部 5 个马斯顿方格进行表示,显然很难准确地描述蒸发波导的统计规律,实用性较差. 相

反,采用 NCEP 数据的网格是图中细线构成的方格,与马斯顿方格相比,分辨率提高约 28 倍.

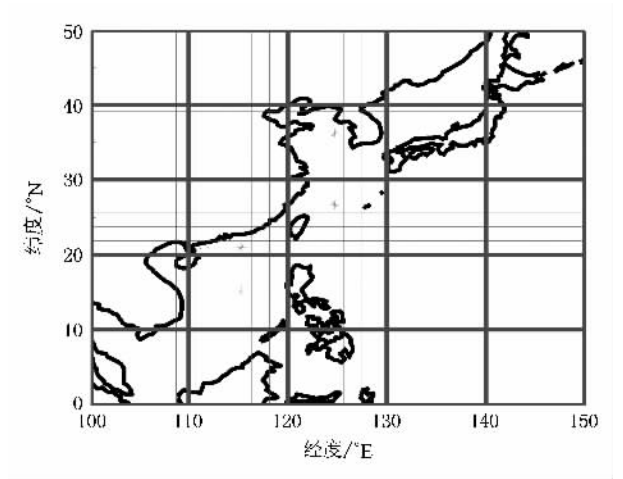


图 5 蒸发波导特性网格点划分图

在 AREPS 软件中,从获得统计特性的样本数来看,黄海、东海、南海北部、南海中部、南海南部 5 个马斯顿方格的样本数分别为 36131,161840,49665,289345,40734,由于数据来自船测数据,东海和南海中部的样本数较多,这与该海域航线很忙有关. 本文采用 1990—2008 的 NCEP 数据,除 2001 年数据有异常不使用外,每个格点的数据样本数为 26280,若与 AREPS 软件一样求取马斯顿方格内的平均,则每个马斯顿方格内 NCEP 样本总数为 735840,大约分别是以上 AREPS 中 5 个马斯顿方格样本数的 20.4,5,14.8,2.5 和 18 倍.

利用自 1990 年以来共 18 年的 NCEP 气象数据,采用 NPS 模型可计算得到全球海域的蒸发波导高度月平均值,如图 6 所示为西太平洋蒸发波导高度平均值随月份的变化,图 7 是从南到北 4 个局部海域的波导平均高度随月份的变化. 分析图 6 和图 7 可看出不同海域、不同月份的蒸发波导具有以下明显的时空分布特征:

- 1) 渤海及黄海:3—7 月的波导高度很高,尤其是在 5 月,达到西太平洋海域的最高值,在黄海典型海域(图 5 中的星号表示)的波导平均值高达 28.5 m,该海域全年中 1 月、8 月、12 月的波导相对较低.
- 2) 东海及其以东的西太平洋海域:1—4 月和 10—12 月的波导较高,而在 5—9 月的平均波导高度小于 10 m.
- 3) 南海北部沿海海域:1—3 月和 11,12 月的波导较高,平均值约为 14 m,而在 4—10 月的平均波导高度较低,一般小于 10 m.

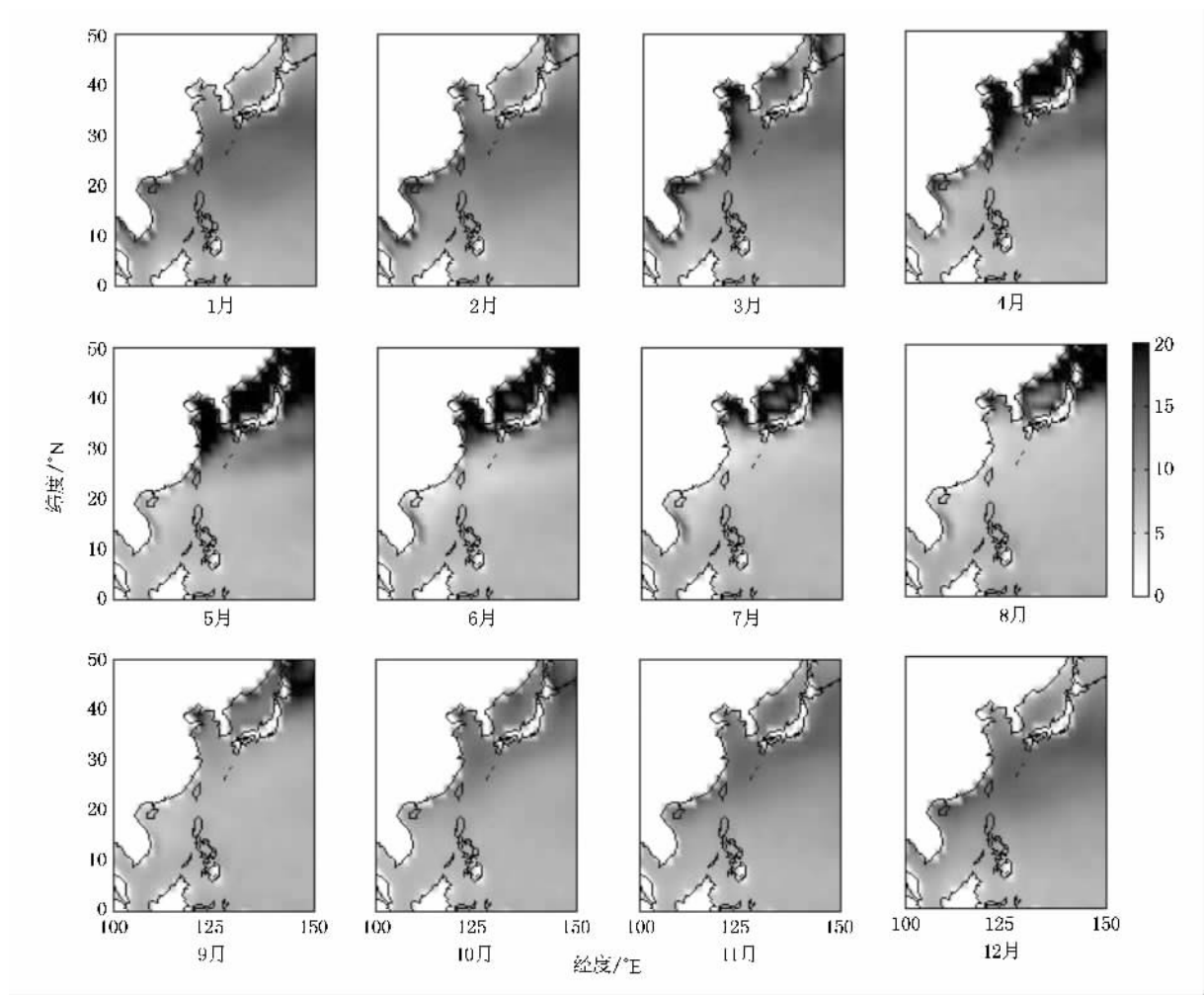


图 6 西太平洋蒸发波导高度随月份的变化

4)南海中部海域:整体上比其他海域的蒸发波导弱,除 1、2 月和 12 月的波导高度约 10 m 外,其他月份的波导高度平均值都较低。

5)整个西太平洋海域:1—5 月和 10—12 月,西太平洋北部海域比赤道附近海域的蒸发波导强,而在 6—8 月,黄海、渤海的波导较高,西太平洋南部海域的波导次之,而东海的波导较低。

因此,从长时间的统计平均来分析,在我国周边海域,由于受到复杂气象要素和气候变化的影响,蒸发波导的分布规律并不简单符合“南方比北方高、夏季比冬季高”的一般原则,而是具有复杂的时空分布特征和内在原因。

图 7 比较了 AREPS 和 NCEP 数据所获得的蒸发波导高度。AREPS 在中国周边海域主要有 4 个 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的马斯顿方格(见图 5),分别是南海、南海北部、东海和黄海。为了具有可比性,将 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 马斯顿方格内所有 NCEP 数据格点的蒸发波导高度进行平

均,也获得了相同马斯顿方格的蒸发波导平均值。从图 7 中可以看出:由于蒸发波导估计的数据来源不同,最重要的是估计蒸发波导的方法不同,蒸发波导高度存在较大差异,NPS 估计值一般比 PJ 估计值小,这与文献[8]中认为 PJ 模型估计值偏大的结果一致。从模型的理论分析和数据的时效性,以及通过前述的与浮标数据的比较来看,本文基于 NCEP 数据和 NPS 模型的蒸发波导分析结果,具有更高的精度。

3.2. 西太平洋蒸发波导特性的成因分析

利用 NCEP 再分析数据中的 1990—2008 年月平均数据,可得到西太平洋海域空气温度、气海温差、风向、风速和相对湿度的时空分布统计特性,其中气海温差和相对湿度分别如图 8 和图 9 所示(其他参数的统计特性也可类似得到)。结合蒸发波导高度对气象要素的敏感性特点,并根据气象要素的长期月

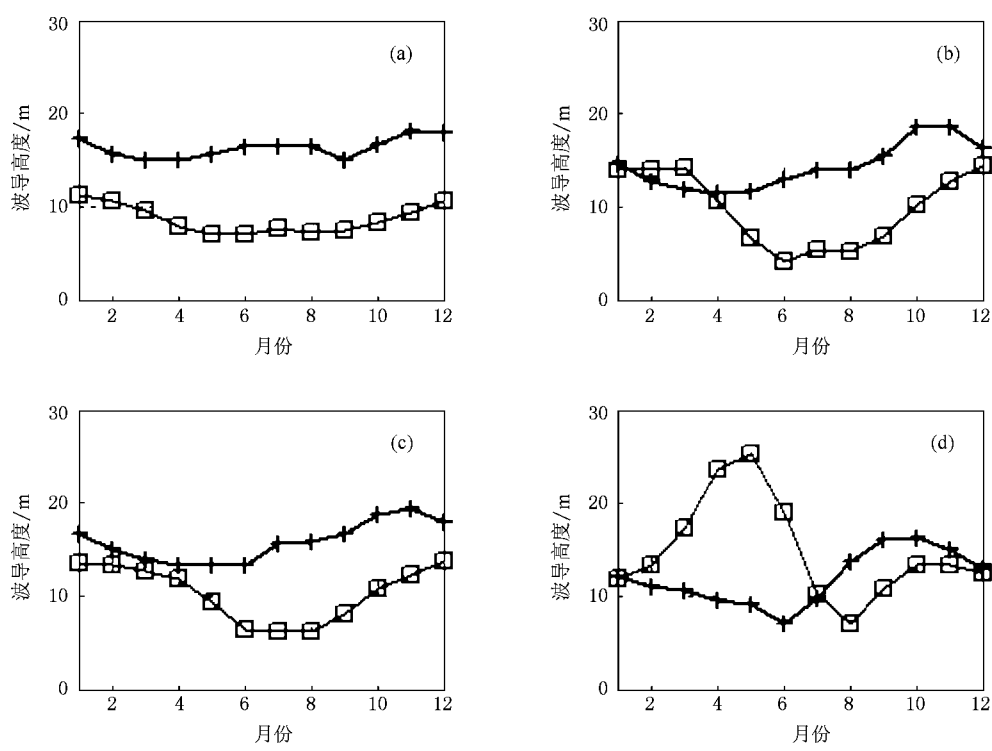


图7 AREPS与NCEP数据所获得蒸发波导高度的比较 带十字线为AREPS,带方框线为NCEP数据.(a)南海(b)南海北部(c)东海(d)黄海

平均规律,我们分析形成图6和图7所示蒸发波导时空特性的原因如下:

1) 渤海及黄海:3—7月的波导高度很高,主要原因是该海域在这些月份的气海温差大于 0°C ,近海面处于稳定层结特征,再加上该海域具有 2 m/s 的小风速,相对湿度一般小于 80% ,由2.3节的分析可知,这种气象条件将形成很高的蒸发波导;1月和12月处于不稳定条件,尽管相对湿度较低,但由于温度和风速较低,导致波导高度较低;8月多为中性条件,但由于风速仅为 3 m/s ,且相对湿度约为 90% ,导致8月份的蒸发波导为全年最低。

2) 东海及其以东的西太平洋海域:近海面气象大部分处于不稳定条件,1—4月和10—12月的波导较高,主要原因是相对湿度较低,一般在 80% 以下,而在5—9月的平均波导高度小于 10 m ,主要原因是相对湿度很高,平均值高达约 90% 。

3) 南海北部沿海海域:以不稳定层结为主,1—3月和11、12月的波导较高,平均值约为 14 m ,主要原因是相对湿度较低、且风速较大,而在4—10月的平均波导高度较低,一般小于 10 m ,主要原因是风速变小,而相对湿度很高,平均值高达 90% 左右。

4) 南海中部海域:近海面主要是不稳定气象条

件,1、2月和12月的风速较高,波导高度约为 10 m ,其他月份的波导高度平均值都较低,主要原因是该海域在1—4月、10—12月的相对湿度一般都在 85% 以上,而5—9月的风速又较小,使得该海域整体上比其他海域的蒸发波导弱。

5) 整个西太平洋海域:1—5月和10—12月,西太平洋北部海域比赤道附近海域的蒸发波导强,主要原因是相对湿度在北部海域较低;而在6—8月,黄海、渤海的波导较高,与该海域处于稳定层结有关,西太平洋南部海域的波导次之,东海的波导较低,主要原因是东海在6—8月份的相对湿度高,且风速不大。

6) 风向的影响:我国绝大多数地区一年中风向发生着规律性的季节更替,这是由我国所处的地理位置主要是海陆配置所决定的。由于大陆和海洋热力特性的差异,冬季严寒的亚洲内陆形成一个冷性高压,东部和南部的海洋上相对成为一个热性低压,高压区的空气要流向低压区。因此,在1—4月和9—12月,东海及其以南的大部分海域以东北风居多,黄海以北主要为西北风。相反在5—8月的夏季,大陆热于海洋,高温的大陆成为低压区,凉爽的海洋成为高压区,因此我国大部分近海

以东南风和西南风为主.

风向对相对湿度具有重要的影响.在黄海、东海北部及其以东的西太平洋海域,在 1—4 月和 11—12 月,由于主要是西北风,由大陆风带来的干燥气流使得该部分海域的相对湿度比南方海域小,这与蒸发波导在该海域较强的分布特征比较一致.而我国东南沿海在 5—9 月的相对湿度较高,这主要是由于东南风从海洋带来的湿润空气,而且也是热带风暴和

台风多发季节,雨水较多产生的,这与东南沿海在这些月份的蒸发波导高度较低比较一致.

从以上分析可以看出,西太平洋蒸发波导的时空分布特征,受多种气象要素时空分布特性的影响,其内在关系十分复杂,影响的主要要素包括气海温差、相对湿度、风速和空气温度,风向虽没有直接作用,但风向的转换,也反映在相对湿度的变化上,从而引起蒸发波导特性的变化.

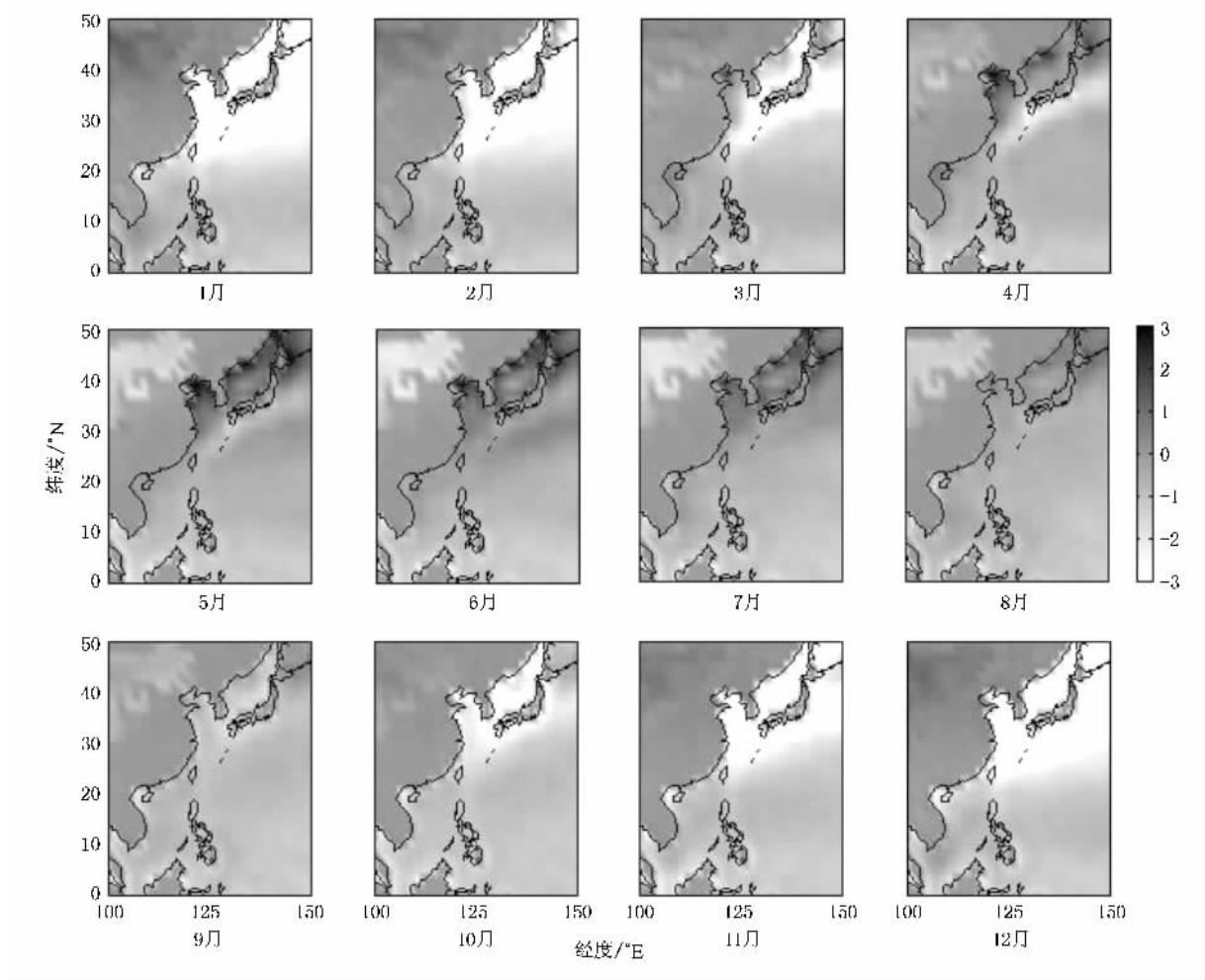


图 8 气海温差长时间月平均值的时空分布

4. 结 论

针对现有蒸发波导观测方法只能限于单点或局部海域的缺点,利用国际上开放的 NCEP 全球气象再分析同化数据库,建立了大面积海域蒸发波导特性的长时间统计特性分析方法,利用海上气象浮标数据、海岛测量数据进行了方法的验证.与海上单点观测相比,该方法的显著优点是:大范围、全球同步、

长时间、高分辨率和极低成本,而且可一直延续到今后不断进行蒸发波导特性随全球气候变化的跟踪分析.与国外现有的蒸发波导统计特性数据库相比,本文方法采用了最近 20 年的气象数据,时效性更高,数据样本更多,空间分辨率提高约 28 倍,具有更高的可信度和更重要的实际应用价值.

利用建立的蒸发波导统计特性分析方法,获得了整个西太平洋蒸发波导的高分辨时空统计规律,定量分析了典型海域的蒸发波导在不同月份的均值

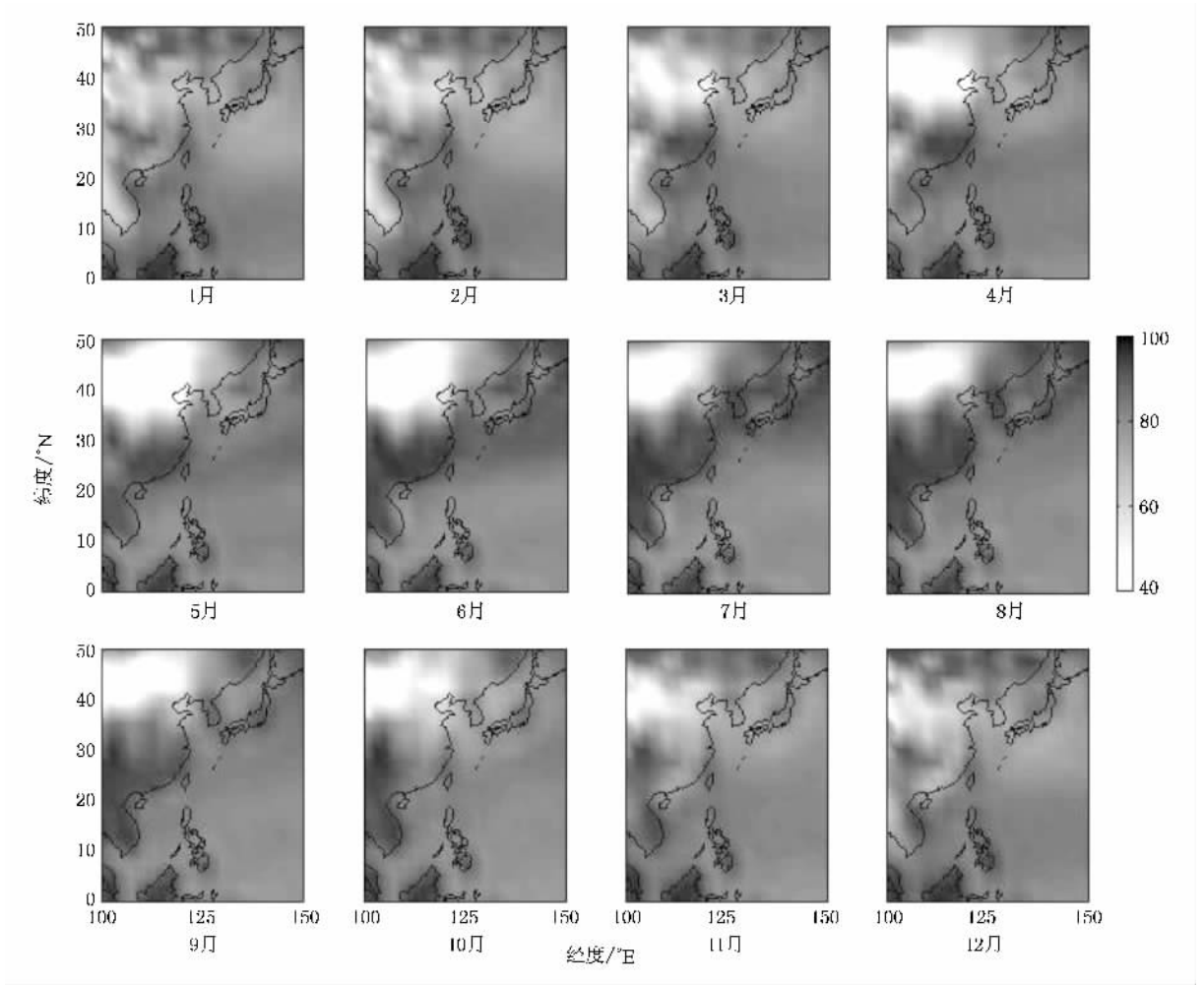


图9 相对湿度长时间月平均值的时空分布

和概率分布.根据蒸发波导形成的机理分析其原因表明,西太平洋蒸发波导的时空分布特征,受相对湿度、风速风向、空气温度和气海温差等多种气象要素时空分布特性的影响,其内在关系十分复杂.

文中采用的 NCEP 再分析数据,每天只有间隔 6 h 的 4 个数据样本,这在开阔海域可以代表整天的变化趋势,因此获得的统计规律在开阔海域的可信度较高,这通过与太平洋浮标数据的比较进行了证实.而在靠近大陆沿岸的近海海域,由于受到陆地的影响,气象参数在一天中是复杂多变的,利用 NCEP

的 4 个数据样本来描述 1 天的变化,可能存在较大的误差,这在海岛数据的评估中得以证实.

利用本文建立的方法,也可开展不同预测模型的比较和验证,同时,由于 NCEP 是大范围同步获取的数据,可用于分析蒸发波导水平不均匀性对微波传播的影响,此外,利用蒸发波导内的微波传播特性来评估蒸发波导的统计特性,并结合实际电磁系统的参数,将蒸发波导统计特性映射为微波路径损失、系统作用距离等应用参量的统计特性,这些都值得进一步深入研究.

[1] Anderson K D 1995 *IEEE Trans. Antennas Propagation* **43** 609
[2] Barrios A E , Anderson K , Lindem G 2006 *IEEE Trans. Antennas Propagation* **54** 2869
[3] Jiang B , Wang H Q , Li X , Guo G R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3985 (in Chinese) [姜 斌、王宏强、黎 湘、郭桂蓉 2006 物

理学报 **55** 3985]
[4] Hristov T S , Anderson K D , Friehe C A 2008 *IEEE Trans. Antennas Propagation* **56** 1103
[5] Caglar Y , Gerstoft P , Hodgkiss W S 2008 *IEEE Trans. Antennas Propagation* **56** 1058

- [6] Wang H , Zhang Y G , Huang X M 2008 *Acta Armamentarii* **28** 1195
(in Chinese) [王 华、张永刚、黄小毛 2008 兵工学报 **28** 1195]
- [7] Pan Y , Yang K D , Ma Y L 2008 *Computer Simulation* **25** 324 (in Chinese) [潘 越、杨坤德、马远良 2008 计算机仿真 **25** 324]
- [8] Babin S , Young G , Carton J 1997 *J. Appl. Meteorol.* **36** 193
- [9] Babin S , Docker Y G D 2002 *J. Appl. Meteorol.* **41** 434
- [10] Frederickson P A , Davidson K L , Newton A 2003 *Battlespace Atmospheric and Cloud Impacts on Military Operations Conference* Monterey , California , September 9—11 , 2003 p1
- [11] Paulus R A 1985 *Radio Sci.* **20** 887
- [12] Musson G L , Gauthier S , Bruth E 1992 *Radio Sci.* **27** 635
- [13] Liu C G , Huang J Y , Jiang C Y 2001 *Chin. J. Electron.* **29** 970
(in Chinese) [刘成国、黄际英、江长荫 2001 电子学报 **29** 970]
- [14] *Advanced Refraction Effects Prediction System (AREPS)* Available at : <http://areps.spawar.navy.mil/>
- [15] Kistler R 2001 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **82** 247
- [16] Fairall C W , Bradley E F 2003 *J. Climate* **16** 571

Spatio-temporal distributions of evaporation duct for the West Pacific Ocean ^{*}

Yang Kun-De[†] Ma Yuan-Liang Shi Yang

(College of Marine , Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072 , China)

(Received 7 March 2009 ; revised manuscript received 5 May 2009)

Abstract

The evaporation duct is a natural microwave trapping phenomenon over water surfaces , which has a strong impact on near-surface electromagnetic propagation . For radar and communication system designs and operations , it is of great significance to obtain the long-term mean features of evaporation duct in a large-scale sea . In order to overcome the shortcomings of single-point measurement at local sea , a method for calculating the statistical features of the evaporation duct in a large scale-sea based on the NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data was presented . This method was confirmed by using the weather buoy data at the Pacific Ocean and the measurement data on the Weizhou Island in the South Sea of China . With NCEP reanalysis data of 18 years , the spatio-temporal features of evaporation duct in the West Pacific Ocean were studied . The distribution features of the evaporation duct height for different seas and months were obtained . The evaporation duct database was established with spatial resolution of about $1.875^{\circ} \times 1.9^{\circ}$, which is 28 times higher than the existing $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ database .

Keywords : evaporation duct , reanalysis data , electromagnetic wave , statistical features

PACC : 9210 , 9260

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10774119) , the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-08-0455) , the NPU Foundation for Innovation , and the NPU Foundation for Fundamental Research .

[†] E-mail : ykdzym@nwpu.edu.cn