

基于中尺度模式 MM5 下的海洋蒸发波导预报研究^{*}

焦 林 张永刚

JIAO Lin ZHANG Yonggang

海军大连舰艇学院军事海洋系,大连,116018

Department of Military Oceanography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

2007-11-28 收稿,2008-12-18 改回.

Jiao Lin, Zhang Yonggang. 2009. An evaporation duct prediction model coupled with the MM5. *Acta Meteorologica Sinica*, 67 (3): 382—387

Abstract The evaporation duct is an abnormal refractive phenomenon in the marine atmosphere boundary layer. It is generally accepted that the evaporation duct prominently affects the performance of the electronic equipment over the sea because of its wide distribution and high occurrence. It becomes the research focus of the navies all over the world. Owing to the inhomogeneous distribution of land and sea, and the effects of coastal topography and land-sea breezes, the alongshore effect of the evaporation duct often takes place. This effect will decrease the accuracy of the evaporation duct diagnosis. At present, there are many diagnostic model of the evaporation duct, such as the P-J model, MGB model, NPS model, Babin model, etc. They are all based on the Monin-Obukhov similarity theory, with only differences in the flux and character scale calculations in the surface layer. These models are applicable to the stationary and uniform open sea areas without considering the alongshore effect. The current paper introduces the flux-profile relations of Zhang and Hu, namely the nonlinear factor α_v , and the gust wind item w_g into the Babin model, and thus extends the evaporation duct diagnosis model based on the Babin model to the offshore coast under extremely low wind speed. In addition, an evaporation duct prediction model is designed and coupled with the fifth generation mesoscale model (MM5). The tower observational data and radar data at the Pingtan island of Fujian Province on May 25—26, 2002 are used to validate the forecast results. The outputs of the prediction model agree with the observations from 0 to 48 hours. The error of the predicted evaporation duct height is 0.193, and the prediction results are in accordance with the radar detection.

Key words Evaporation duct diagnosis, Nonlinear factor, Gust item, Mesoscale model MM5, Evaporation duct prediction Model, Numerical simulation

摘 要 蒸发波导是发生在海气边界层的一种异常折射现象,由于其分布范围广、发生概率大,被认为是对海上电子设备影响最为显著的波导类型,成为各国海军竞相研究的焦点。然而由于其形成机制复杂,且在近岸沿海地区由于海陆分布不均,以及海岸地形和海陆风等因素的作用,会造成蒸发波导的近岸效应,这种效应会影响蒸发波导高度诊断的准确率。目前国内、外蒸发波导诊断模式有 P-J 模式、MGB 模式、NPS 模式、Babin 模式等,但其基本原理都是依赖 Monin-Obukhov 相似理论,只是用于确定近地层通量和特征尺度的方法不同,且仅适用于定常和水平均匀的开阔海域,并没有考虑到蒸发波导的近岸效应。针对这一问题,文中在 Babin 模式的基础上引入张强、胡隐樵的通量廓线关系(非线性修正因子 α_v)与阵性风速 w_g ,从而将蒸发波导诊断模式的适用范围扩展到近岸沿海地区和甚低风速条件下。此外在中尺度模式 MM5 的基础上,耦合改进的 Babin 模式,发展建立了一个海洋蒸发波导高度预报模式,并对预报模式进行数值模拟,利用 2002 年 5 月 25—26 日福建平潭岛的海上大气实测数据与雷达探测结果对预报模式输出结果进行了验证。验证结果表明:在 0—48 小时内模式输出值与实测值拟和较好且变化规律一致,预报蒸发波导高度平均误差为 0.193;且蒸发波导高度预报结果与雷达实际探测结果一致。

关键词 蒸发波导诊断,非线性修正因子,阵性风速,中尺度模式 MM5,蒸发波导预报模式,数值模拟

中图法分类号 P421.31

^{*} 资助课题:自然科学基金国家 863-701 海洋环境监测资助项目。

作者简介:焦林,主要从事海洋大气环境的数值模拟与预报。Email:erjiaopi@21cn.com

1 引言

蒸发波导是海洋大气近地层内特有的一种异常折射结构,它对海上电磁波传播有着重要影响。研究表明:蒸发波导条件下,电磁波传播特征将发生改变,传播能量损耗减小,传播路径发生弯曲,部分电磁波会被陷获到波导层内,形成超视距传播。

由于海洋近地层大气具有明显的湍流特性,各气象要素瞬时值难以测量,因而通常不采用构建大气折射率廓线的方法来确定蒸发波导结构,而是根据海洋大气近地层相似理论,利用海面水文、气象要素的宏观观测来计算蒸发波导及其特征量。然而在蒸发波导预报方面,由于以往大多数气象预报模式缺乏足够的初始资料和垂直分辨率,模式的最底层输出量也在近地层以上,因而一直没有找到一种较好的解决方法。随着数值天气预报特别是中尺度气象学的迅速发展,中尺度模式已具有较高的垂直分辨率,并能够对近地层的中尺度现象进行数值预报与模拟。本文正是在第 5 代中尺度数值预报模式 MM5 的基础上,发展建立了一个海洋蒸发波导预报模式。

2 蒸发波导的形成机制及其特征量计算

2.1 海洋蒸发波导的形成机制

由于海水与大气具有不同的热力学性质,在太阳辐射作用下,大气与海洋交界面将产生不平衡的热力结构。基于这种结构,海水主要通过蒸发潜热驱动大气,海表水蒸气的蒸发使得大量水汽附在海表近地层附近,通过湍流垂直输送,扩散至一定高度形成界面。界面上方是水汽含量较少的干空气,界面下方是含有一定水汽量的湿空气,而海表面的水汽含量是饱和的,这种从海表面到界面层的湿度随高度递减现象,改变了正常海洋近地层大气的温、湿分布,进而改变大气的折射结构。当水汽含量随高度锐减时,将会产生极端超折射即大气波导,由于这种波导主要是海水蒸发造成的,因而通常称之为蒸发波导,其折射结构如图 1 所示。

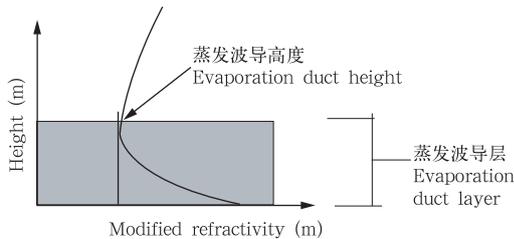


图 1 蒸发波导的折射结构
Fig. 1 The refractive profile of an evaporation duct

2.2 海洋蒸发波导高度的确定

蒸发波导高度是海洋蒸发波导重要的特征量,是表征波导强度的重要参数,也是确定蒸发波导对电子设备影响的一个重要参量。目前国内外确定蒸发波导高度的模式有多种,但其基本原理相同,都是依赖近地层相似理论,只是用于确定近地层通量和特征尺度的方法不同。本文采用 Babin(1996)基于通量算法的新模型来计算蒸发波导高度,并在此基础上加入了张强等(1995)的通量廓线关系,从而将莫宁-奥布霍夫理论拓展到甚低风速条件下和近岸沿海地区。

对于微波波段,对流层大气折射指数 N 为

$$N = 77.6 \frac{p}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

式中 p, e 分别是大气压强和水汽压强, T 为大气温度。

上式两边对高度求导,并将大气温度 T 用位温 θ 、水汽压 e 用比湿 q 代替,可得

$$\frac{dN}{dz} = C_1 + C_2 \frac{d\theta}{dz} + C_3 \frac{dq}{dz} \quad (2)$$

式中 C_1, C_2, C_3 为相关参数,其表达式分别为

$$C_1 = (-\rho g \times 0.01) \cdot \left(\frac{A}{T} + \frac{ABq}{T^2(\epsilon + (1-\epsilon)q)} \right) - \frac{g(p - (1-\epsilon)e)}{c_{pa}} \left(-\frac{A}{T^2} - \frac{2ABq}{T^3(\epsilon + (1-\epsilon)q)} \right)$$

$$C_2 = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R_a}{c_{pa}}} \left(-\frac{Ap}{T^2} - \frac{2ABpq}{T^3(\epsilon + (1-\epsilon)q)} \right)$$

$$C_3 = \frac{ABp\epsilon}{T^2(\epsilon + (1-\epsilon)q)^2}$$

$A = 77.6 \text{ K/hPa}, B = 4810 \text{ K}^2/\text{hPa}; p, e$ 是气压、水汽压,单位取 hPa; T 是气温,单位取 K; p_0 为参考气压,取为 1000 hPa; R_a 为干空气比气体常数,值为 $287.05 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}); c_{pa}$ 为干空气的定压比容,值为 $1004 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}); \epsilon = 0.62197; \rho$ 是空气密度,单位取 $\text{kg}/\text{m}^3; g$ 是重力加速度,单位取 m/s^2 。 C_1, C_2, C_3 可由边界层内参考高度的大气温度、湿度、压强以及海表水温计算得出。

使用 Monin-Obukhov 相似理论表达式来确定 $d\theta/dz, dq/dz$

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{\theta_*}{kz} \varphi_H \left(\frac{z}{L} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dq}{dz} = \frac{q_*}{kz} \varphi_V \left(\frac{z}{L} \right) \quad (4)$$

其中 θ_*, q_* 分别是位温和比湿的 Monin-Obukhov

特征尺度参数; φ_H 、 φ_V 分别是温度和湿度的无量纲 Monin-Obukhov 廓线函数; L 是 Monin-Obukhov 长度; k 是卡门常数, 取为 0.4。

将式(3)、(4)代入式(2)得

$$\frac{dN}{dz} = C_1 + C_2 \frac{\theta_*}{kz} \varphi_H\left(\frac{z}{L}\right) + C_3 \frac{q_*}{kz} \varphi_V\left(\frac{z}{L}\right) \quad (5)$$

引入张强等(1995)提出的非线性修正因子 α_V , 其中

$$\alpha_V = \frac{\varphi_V}{\varphi_H} \approx \frac{1 + 2z/L}{1 + 5.4z/L} \quad (6)$$

由波导定义可知, 当大气折射指数垂直梯度等于形成波导的临界值 -0.157 m^{-1} 时, 所对应的高度 z 就是波导高度 z_d , 所以

$$z_d = \frac{-(C_2\theta_* + \alpha_V C_3 q_*)}{k(C_1 + 0.157)} \varphi_H\left(\frac{z_d}{L}\right) \quad (7)$$

为求得蒸发波导高度 z_d , 需确定 L 、 θ_* 、 q_* 、 φ_H , 依据 Liu 等(1979)导出的关系式来计算 θ_* 、 q_* 、 φ_H 与 L :

$$\theta_* = k(\theta_z - \theta_{z_0}) [\ln(z/z_0) - \Psi_H(z/L)] / 0.74 \quad (8)$$

$$q_* = k(q_z - q_{z_0}) [\ln(z/z_0) - \Psi_V(z/L)] / 0.74 \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \Psi_H(z/L) = 2\ln[(1 + 0.74\varphi_H^{-1})/2] & \text{当 } z/L \leq 0 \\ \Psi_H(z/L) = -6.35z/L & \text{当 } z/L > 0 \\ \Psi_V(z/L) = 2\ln[(1 + 0.74\alpha_V\varphi_H^{-1})/2] & \text{当 } z/L \leq 0 \\ \Psi_V(z/L) = -6.35z/L & \text{当 } z/L > 0 \\ \varphi_H \approx \begin{cases} 0.74(1 - 9z/L)^{-0.5} & \text{当 } z/L \leq 0 \\ 0.74 + 4.7z/L & \text{当 } z/L > 0 \end{cases} \end{cases}$$

Monin-Obukhov 长度 L 表示为

$$L = \frac{U_*^3}{kg\left(\frac{\theta_*}{T_0} + 0.608q_*\right)} \quad (10)$$

上式中:

$$\begin{cases} U_* = kV_z [\ln(z/z_0) - \Psi_M(z/L)] / 0.74 \\ \Psi_M(z/L) = 2\ln[(1 + \varphi_M^{-1})/2] + \ln[(1 + \varphi_M^{-2})/2] - 2\arctan\varphi_M^{-1} + \pi/2 & \text{当 } z/L \leq 0 \\ \Psi_M(z/L) = -4.7z/L & \text{当 } z/L > 0 \\ \varphi_M \approx \begin{cases} (1 - 15z/L)^{-0.25} & \text{当 } z/L \leq 0 \\ 1 + 4.7z/L & \text{当 } z/L > 0 \end{cases} \end{cases}$$

V_z 为 z 高度上的全风速, T_0 为近地层平均气温。

为将相似理论推广到甚低风速下, 引入阵性风

速 w_g , 用新的地面风速 $S = u_x^2 + u_y^2 + w_g^2 = u^2 + w_g^2$ 的平方根代替风速值。

$$w_g = \beta w_* = \beta(F_b z_i)^{1/3} \quad (11)$$

$$F_b = -\left(\frac{g}{T}\right) \overline{w'T'_v} \quad (12)$$

其中 w_g 为阵性风速, w_* 是自由对流速度特征尺度, β 为经验常数, 其量级为 1.0, 一般取 1.25 (Fairall, 1996), F_b 为浮力通量项, 代表湍流的波动性, $\overline{w'T'_v}$ 为垂直虚温通量, z_i 为对流混合层高度。

3 海洋蒸发波导预报模式的构建

基于蒸发波导的形成机制及其特征量的计算方法, 本文利用中尺度模式 MM5 耦合改进的 Babin 模式, 来预报海洋蒸发波导高度, 其具体流程如图 2 所示。

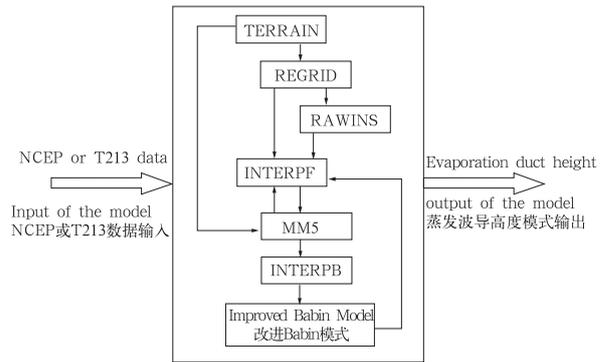


图 2 海洋蒸发波导预报模式框图
Fig. 2 The framework of the evaporation duct prediction model

蒸发波导预报模式中 TERRAIN 模块的功能是从标准经纬网格各种分辨率地形高度资料和下垫面地表类型分类资料中插值求取模式直角坐标网格点上地形高度和地表类型, 并提供陆面过程模式所需的参数; REGRID 模块的作用是以低分辨率的全球经纬网格分析场资料插值求得有限区域模式正方形网格点上的初估场; RAWINS 模块将 REGRID 模块插值后的物理量场作为第一猜测场进行地面和高空客观分析; INTERPF 模块将 RAWINS 输出的等压面模式网格点资料垂直插值到模式的层, 从而产生模式初始场; MM5 是主预报模块, 用于预报大环境场; INTERPB 模块将 MM5 模式结果插值到等压面上(张金善等, 2005); 改进的 Babin 模式用于计算蒸发波导高度。其中 MM5 与改进的 Babin 模

式通过海面大气温度、大气湿度、海表水温、海面风速、海平面气压、粗糙高度、对流混合层高度及 Monin-Obukhov 长度相耦合。边界层参数化方法采用 MM5 中 MRF 参数化方案,该方案既包括边界层物理过程又包括自由大气物理过程,分辨率较高。

4 预报模式的数值模拟与验证

为了检验蒸发波导预报模式的准确性,本文采用 2002 年 5 月 25 日的 NCEP 数据进行数值模拟,并利用 2002 年 5 月 25 日平潭岛试验的实测数据对模拟结果进行验证。

这次观测试验地点在福建省平潭岛,试验的主要内容是通过铁塔传感器测量的近地层大气温度、湿度、气压、风速风向、海表水温来计算蒸发波导,进而与雷达的实际观测数据进行对比以确定蒸发波导诊断的准确度。

4.1 模拟试验的方案设计

预报模式模拟试验的初始场为 NCEP 一日 4 次 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格点资料,预报区域选择两层嵌套区域,第 1 区域的水平网格点为 75×75 ,格点网格距为 81 km,第 2 区域的水平网格点为 31×31 ,格点网格距为 27 km,预报区域中心点在 ($32^\circ\text{N}, 118^\circ\text{E}$)。大气垂直不均匀分为 31 层(近地层内 2 层),试验铁塔与雷达观测点位于第 2 预报区域的网格坐标为 (22, 16)。初始时间 2002 年 5 月 25 日 00 时(世界时),预报时效为 48 h。为了保证计算的稳定性,对于预

报方程中的声波项 u, v, w 采用分裂时步法,即在一个长时间间隔采用若干短时步来预报速度场和气压场。预报区域如图 3 所示。

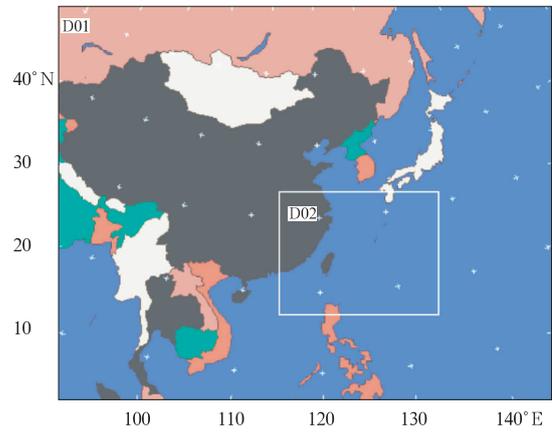


图 3 预报区域图

Fig. 3 The model domain

4.2 预报结果与实测结果的对比分析

由蒸发波导预报模式的输出结果,我们得到 2002 年 5 月 25 日 00 时—27 日 00 时(世界时)连续 48 h 的蒸发波导高度值。利用铁塔实测数据进行验证,从预报结果与实测结果的对比分析(图 4)可以看出在 1—48 小时内蒸发波导高度预报值与实测值拟和得较好且变化规律基本一致。利用平均误差

计算公式: $\sigma = \frac{\sum_{n=1}^{48} \text{abs}(P-O)}{48}$, 得到数值模拟试验预报蒸发波导高度平均误差为 0.193。

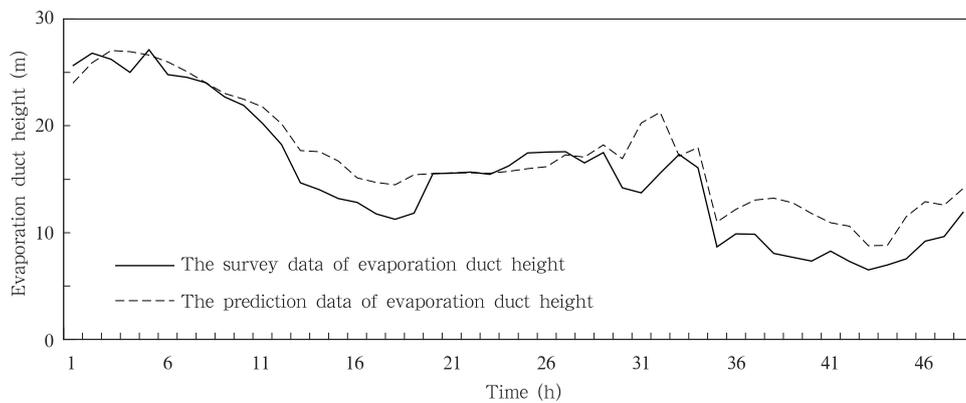


图 4 蒸发波导的预报结果与实测结果对比分析

Fig. 4 A comparison between the predicted and the observed evaporation duct height

4.3 预报结果与雷达观测结果的对比分析

雷达的安装高度为 14.8 m,观测范围 79° —

232° ,因而只要波导高度大于 14.8 m 雷达就可以观测到超视距目标。通过对比雷达观测结果和波导高

度值进一步检验蒸发波导预报模式的准确性,如表1所示。需要指出的是表中最后两组雷达超视距探

测结果是由于表面波导造成的,当时实测的蒸发波导高度小于 14.8 m。

表1 雷达观测结果与蒸发波导高度预报结果对比分析

Table 4 A contrast between the model prediction and the radar detection

时间(世界时)	波导高度预报值(m)	雷达探测目标距离(n mile)	探测结果	波导预报高度与雷达探测结果是否一致
2002/05/25/01	24.048	37.4	超视距	一致
2002/05/25/04	26.64	45.5	超视距	一致
2002/05/25/07	25.07	65.3	超视距	一致
2002/05/25/12	20.177	38.2	超视距	一致
2002/05/25/15	16.705	62.4	超视距	一致
2002/05/26/00	15.72	61.7	超视距	一致
2002/05/26/03	17.28	54	超视距	一致
2002/05/26/09	22.163	88.8	超视距	一致
2002/05/26/12	25.197	79.2	超视距	一致
2002/05/26/15	25.8	78.5	超视距	一致

5 结论与讨论

通过对蒸发波导预报模式的数值模拟及结果分析,得出以下结论:

(1) 在考虑中国近海及临海特点的基础上,通过分析海-气耦合过程及海面蒸发波导形成的机制,利用张强、胡隐樵的通量廓线关系和阵性风速改进了蒸发波导高度计算的 Babin 模式,从而将模式的适用范围扩展到近海沿岸地区和甚低风速条件下。

(2) 在中尺度数值预报模式 MM5 的基础上,耦合改进的 Babin 模式,发展建立了一个海洋蒸发波导预报模式。

(3) 对蒸发波导预报模式做了数值模拟,并利用 2002 年 5 月 25—27 日的铁塔实测数据与雷达探测数据对预报结果进行了验证,验证结果表明在 0—48 小时内模式输出值与实测值拟和较好且变化规律一致,预报蒸发波导高度平均误差为 0.193。

(4) 由于缺乏沿海各台站观测资料、雷达探测资料、卫星资料以及观测船获取的资料等,因此本文没有使用模式的四维同化功能。如果能将更多的观测资料同化到蒸发波导预报模式中,则预报模式的预报精度必将得到改善。此外还可以从卫星遥感反演大气波导方向来研究大气波导的预报问题。

致谢: 感谢中国科学院大气物理研究所王自发研究员在中尺度模式 MM5 方面给予的指导,同时感谢中国气象科学研究院姚展予博士提供平潭岛大气波导试验的帮助。

References

- Babin S M. 1996. A new model of the oceanic evaporation duct and its comparison with current models [D]. University of Maryland at College Park, 189-190
- Brutsaert W. 1991. *Evaporation into the Atmosphere Theory, History, and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 298-299
- Burk S D, Thompson W T. 1997. Mesoscale modeling of summertime refractive conditions in the southern California Bight. *J Appl Meteor*, 36: 22-31
- Dai Fushan, Li Qun. 2002. *The Atmospheric Duct and Its Military Application (in Chinese)*. Beijing: Peoples Liberation Army Press, 212-220
- Edson J B, Fairall C W. 1998. Similarity relationships in the marine atmospheric surface layer for terms in the TKE and scalar variance budgets. *J Atmos Sci*, 55: 2311-2328
- Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaoqing. 1999. *Guide Theory of the Oceanography (in Chinese)*. Beijing: Higher Education Press, 170-180
- Grell G A, Dudhia, Stauffer D R. 1993. *Adscription of the -fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. NCAR Technical Note, PENNSYLVANIA, US
- Hu Yingqiao, Ji Yuejin. 1993. The combinatory method for determination of the turbulent fluxes and universal functions in the surface layer. *Acta Meteor Sinica*, 7(1): 101-109
- Liu W T, Katsaros K B, Businger J A. 1979. Bulk Parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *J Atmos Sci*, 36: 1722-1735
- Li Xiaoli, He Jinhai, et al. 2003. The design of urban canopy parameterization of MM5 and its numerical simulations. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 61(5): 526-538
- Lv Meizhong, Peng Yongqing. 1990. *Tutorial of the Dynamical Meteorology (in Chinese)*. Beijing: China Meteorology Press, 120-128
- Steven M Babin, George S Young, James A Carton. 1997. A new model of the oceanic evaporation duct. *J Appl Meteor*, 36: 150-

210

Yin Dazhong, Chen Jiayi. 2000. Development and coupling a land surface parameterization in MM5. *Scientia Atmospheric Sinica* (in Chinese), 24(2):177-187

Zhang Jinshan, Zhong Zhong, Huang Jin. 2005. An introduction to meso-scale model MM5. *Marine Forecasts* (in Chinese), 22(1): 31-40

Zhang Qiang, Hu Yinqiao. 1995. The flux-profile relationships under the condition of heat advection over moist surface. *Scientia Atmospheric Sinica* (in Chinese), 19(1):8-19

附中文参考文献

戴福山,李群. 2002. 大气波导及其军事应用. 北京:解放军出版

社,212-220

冯士口,李凤岐,李少箴. 1999. 海洋科学导论. 北京:高等教育出版社,170-180

吕美仲,彭永清. 1990. 动力气象学教程. 北京:气象出版社,120-128

李晓莉,何金海,毕宝贵等. 2003. MM5 模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. *气象学报*,61(5):526-538

殷达中,陈家宜. 2000. 一个陆面过程参数化模式与 MM5 的耦合. *大气科学*,24(2):177-187

张金善,钟中,黄瑾. 2005. 中尺度大气模式 MM5 简介. *海洋预报*, 22(1): 31-40

张强,胡隐樵. 1995. 热平流影响下湿润地表的通量-廓线关系. *大气科学*, 19(1), 8-19