技术专论

蒸发波导探测系统传感器允许误差分析

戴福山，谢志辉，王胜国，游小宝，姜明波，刘茜，邓冰
（北京应用气象研究所，北京 100029）

摘要：基于自主开发蒸发波导诊断分析模型，开展了蒸发波导高度敏感性数值试验研究，发现在几乎所有层结条件下，海面相对湿度是影响蒸发波导高度变化的最敏感因子，其次是海面气温、海表面水温和海面风速，气压变化影响可忽略不计。若使蒸发波导高度诊断分析均方差小于或接近于蒸发波导高度10%，则在稳定层结下要求气温和海表面水温误差不大于0.2 ℃、相对湿度误差不大于1%、海面风速误差不大于0.5 m/s，在不稳定和中性层结下要求气温和海表面水温误差不大于0.5 ℃、相对湿度误差不大于3%、低风速时风速误差不大于0.5 m/s、高风速时风速误差不大于1.0 m/s。

关键词：蒸发波导；探测系统；允许误差
中图分类号：P404；P716　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2013)02－0083－06

Analysis of Permissible Sensor Errors for Evaporation Duct Detection System

DAI Fu-shan, *XIE Zhi-hui*, *WANG Sheng-guo*, *YOU Xiao-bao*, *JIANG Ming-bo*, *LIU Qian*, *DENG Bing*
(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 10029, China)

Abstract: Based on the evaporation duct model developed by the authors, numerical sensitivity experiments of evaporation duct were studied. It was found that the surface air relative humidity is the most sensitive factor influencing evaporation duct height for almost all stability conditions. The second sensitive factors are the surface air temperature, the sea surface temperature, and the surface wind speed. The contribution of surface air pressure perturbation can be neglected. In order to make the root mean square of the diagnosed height error of evaporation duct less than or greater than but near the 10% of the evaporation duct height, it is required that the surface air temperature error and the sea surface temperature error are not greater than 0.2 ℃, respectively, the relative humidity error is not greater than 1%, and the sea surface wind speed error is not greater than 0.5 m/s in stable condition, but the surface air temperature error and the sea surface temperature error are not greater than 0.5 ℃, respectively, the relative humidity error is not greater than 3%, and the sea surface wind speed error is not greater than 0.5 m/s for slow wind speed, and not greater than 1.0 m/s for high wind speed in unstable and neutral conditions.

Key words: evapoaration duct; detection system; permissible error

蒸发波导是因海面水汽蒸发导致海面附近数十米高度范围内空气湿度自海面向上迅速递减而形成的一类大气波导。紧贴海面气层，因海面蒸发可以达到饱和状态，而在其以上高度空气通常达不到饱

收稿日期：2012-09-30
作者简介：戴福山(1967—)，男，江苏人，理学博士，高级工程师，主要从事大气环境对光电传播影响研究。

和状态，空气湿度在很小高度范围发生锐减，使得大气修正折射指数自海面向上迅速递减，到一定高度后，大气修正折射指数达到最小，该高度称为蒸发波导高度（即厚度）。蒸发波导高度是波导强度的量度，它反映蒸发波导捕获电波的能力。蒸发波导高度越高，受蒸发波导影响的最低电波频率就越低，反之，只有频率较高的电波才受蒸发波导影响。蒸发波导在几乎所有海域所有时间都可能存在，是最具有利用价值的一类大气波导[1]。

为了充分利用蒸发波导，需要在船上装载蒸发波导探测系统。因蒸发波导出现在海洋大气近地层内，蒸发波导高度主要是利用海面水文气象要素的观探测数据，借助于海洋大气近地层相似理论诊断计算确定，因此，蒸发波导探测系统主要传感器是海面气温传感器、气压传感器、相对湿度传感器、风向与风速传感器，以及海表面水温传感器。蒸发波导高度诊断分析准确率既受蒸发波导诊断分析模型影响，又受海面水文气象要素探测误差影响。针对具体蒸发波导诊断分析模型，研究海面水文气象要素探测误差对蒸发波导高度诊断分析误差的影响，对确定蒸发波导探测系统水文气象要素传感器技术指标和选型具有重要参考意义。事实上，仿真试验评价技术作为一种最经济的手段在西方国家装备研制中已得到广泛应用[2]。

国内外较先进的蒸发波导诊断分析模型都是以海气通量算法为基础，典型模型有Babin蒸发波导模型[3]、俄罗斯国立水文气象大学蒸发波导模型（RSHMU）[4]和法国气象局模型[5]等。在文献[4]中，比较了RSHMU模型与其它三个蒸发波导模型对海面水文气象要素误差的敏感性。文中将基于自主开发的蒸发波导诊断分析模型，开展蒸发波导对海面水文气象要素敏感性数值试验研究，分析海面水文气象要素探测误差对蒸发波导高度诊断分析误差的影响，并确定蒸发波导探测系统传感器最大允许误差。

1 蒸发波导诊断分析模型简介

根据近地层相似理论，近地层内水平风速u、位温θ、比湿q的垂直廓线表示为[1]：

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa}\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_u\left(\frac{z}{L}\right)\right] \tag{1}$$

$$\theta(z) - \theta(z_{0t}) = \frac{\theta_*}{\kappa}\left[\ln\left(\frac{z}{z_{0t}}\right) - \psi_t\left(\frac{z}{L}\right)\right] \tag{2}$$

$$q(z) - q(z_{0q}) = \frac{q_*}{\kappa}\left[\ln\left(\frac{z}{z_{0q}}\right) - \psi_q\left(\frac{z}{L}\right)\right] \tag{3}$$

式中：u_*，θ_*，q_*分别为水平风速u，位温θ和比湿q的特征尺度；κ为von Karman常数；z为垂直高度；z_0为水平风速粗糙度高度；z_{0t}为温度粗糙度高度；z_{0q}为比湿粗糙度高度；ψ_u为水平风速对应的普适函数；ψ_t为温度对应的普适函数；ψ_q为比湿对应的普适函数；L为长度尺度；$u(z)$为高度z处的水平风速；$\theta(z)$为高度z处的位温；$q(z)$为高度z处的比湿；$\theta(z_{0t})$为粗糙度高度的位温；$q(z_{0q})$为粗糙度高度的比湿。

利用海表面水温、海面气温、气压、风速和湿度观测数据，借助于式(1)—(3)可以确定u_*，θ_*，q_*，L，进而可以给出海洋大气近地层水平风速u、位温θ、比湿q的垂直廓线[6—8]。再利用位温$\theta(z)$与温度$T(z)$间的关系式，以及比湿$q(z)$与水汽压$e(z)$间关系式，可以得到温度$T(z)$和水汽压$e(z)$的垂直廓线。

海洋大气近地层内大气折射指数N垂直廓线由下式确定：

$$N(z) = \frac{77.6}{T(z)}\left[P(z) + \frac{4810e(z)}{T(z)}\right] \tag{4}$$

式中：$P(z)$为气压，hPa；$e(z)$为水汽压，hPa；$T(z)$为气温，K。大气修正折射指数M定义为：

$$M(z)=N(z)+0.157z \tag{5}$$

式中z为海拔高度，m。大气修正折射指数M最小值所对应的高度就是蒸发波导高度d。

2 蒸发波导高度敏感性数值试验分析

2.1 蒸发波导高度随海面气温与海表面水温之差变化

在假设海面气压为1012 hPa、海表面水温为25 ℃、海面相对湿度为80%、海面风速分别为5，10，15 m/s条件下计算得到蒸发波导高度随海面气温与海表面水温之差的变化如图1所示。

在高风速条件下，蒸发波导高度基本随海面气温与海表面水温之差代数值增大而减小；在低风速条件下，蒸发波导高度随海面气温与海表面水温之

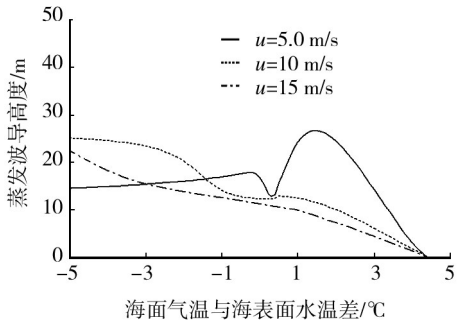

图 1　蒸发波导高度随海面气温与海表面水温之差变化

Fig.1　The variations of evaporation duct height with the temperature difference between surface air and sea surface

差的变化呈双峰分布。为保证蒸发波导诊断分析准确性,要求气温和海表面水温探测误差应尽可能小。

2.2　蒸发波导高度随海面相对湿度变化

在假设海面气压为 1012 hPa、海面气温为 13 ℃、海表面水温为 15 ℃、海面风速分别为 5,10,15 m/s 条件下,计算得到的蒸发波导高度随海面相对湿度的变化如图 2a 所示。可见在海面气温小于海表面水温不稳定层结条件下,不论海面风速条件如何,蒸发波导高度均随海面相对湿度增大而单调减小,反之,蒸发波导高度随海面相对湿度减小而单调增大。

在假设海面气压为 1012 hPa、海面气温为 20 ℃、海表面水温为 20 ℃,海面风速分别为 5,10,15 m/s 条件下,计算得到的蒸发波导高度随海面相对湿度的变化如图 2b 所示。由图 2b 可见,在海面气温等于海表面水温的中性层结条件下,蒸发波导高度随海面相对湿度增大而单调减小。

在假设海面气压为 1012 hPa、海面气温为 16 ℃、海表面水温为 15 ℃,海面风速分别为 5,10,15 m/s 条件下,计算得到的蒸发波导高度随海面相对湿度变化如图 2c 所示。由图 2c 可见,在海面气温大于海表面水温的稳定层结条件下,当海面风速较高时,蒸发波导高度基本上随海面相对湿度增大而单调减小;但当海面风速和相对湿度较低时,蒸发波导高度先随相对湿度增加而增加,后随相对湿度增大而减小。因此,在稳定层结且风速较低条件下,为保证蒸发波导诊断分析准确性,海面空气相对湿度探测误差应

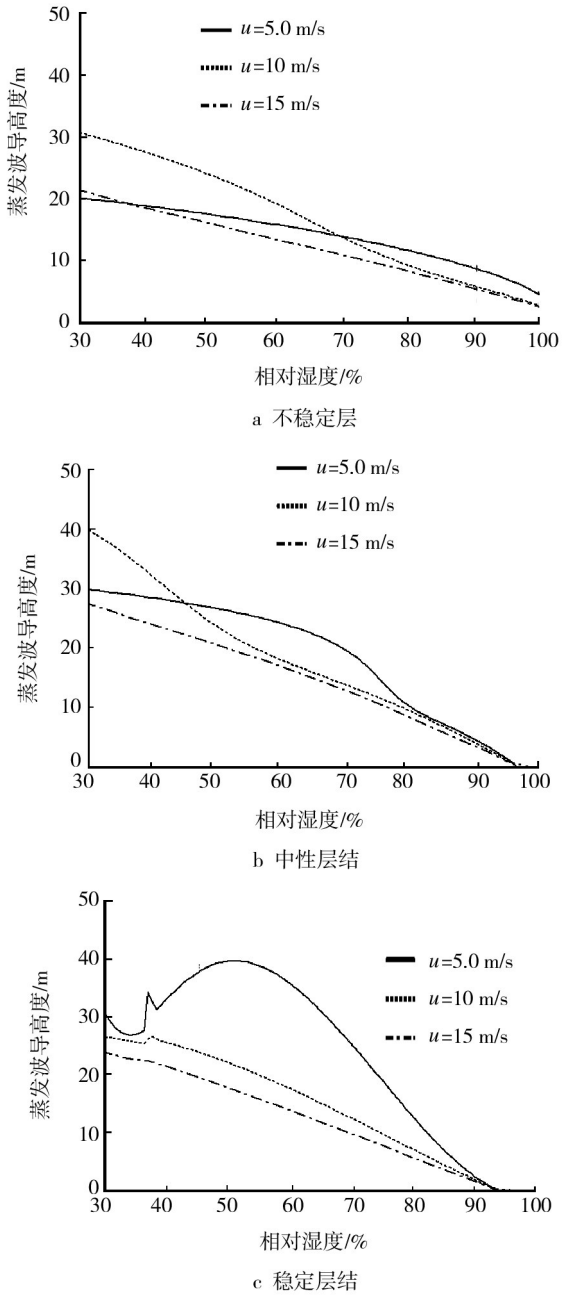

图 2　不同层结不同风速条件下蒸发波导高度随海面相对湿度变化

Fig. 2　The variation of evaporation duct height with surface air humidity and surface wind speed in stable condition

尽可能小。

3　水文气象要素随机扰动对蒸发波导高度诊断误差影响

在其它水文气象条件不变的情况下,通过使某

一要素产生随机扰动，可以研究单一要素随机扰动对蒸发波导高度诊断分析的影响；通过使多个要素同时产生随机扰动，可以研究多个要素同时随机扰动对蒸发波导高度诊断分析的影响；由此可以分析判断海面水文气象要素探测误差对蒸发波导高度诊断分析误差的影响。

表1是在假设海面气温为23.4 ℃、气压为1016.36 hPa、相对湿度为57%、海表面水温为24.8 ℃，以及风速分别为3.66 m/s和10 m/s条件下，利用蒸发波导诊断分析模型计算分析的单一要素随机扰动以及多个要素同时随机扰动对蒸发波导高度诊断误差的影响。表1中括号内百分数表示蒸发波导高度均方差与蒸发波导高度平均值之比。计算中取随机扰动样本量为1000，计算多个要素同时随机扰动对蒸发波导高度诊断分析误差综合影响时，假设各要素的随机扰动互不相关。由表1可看出，在不稳定层结条件下，低风速时，风速是最敏感因子，其次是相对湿度，海面气压扰动影响最小；在10 m/s风速条件下，相对湿度是最敏感因子。

若使蒸发波导高度诊断分析均方差小于蒸发波导高度的10%，则在低风速条件下，气温和海表面水温误差应不大于0.5 ℃，相对湿度误差应不大于3%，海面风速误差应不大于0.5 m/s；在高风速条件下，即使气温和海表面水温误差为0.5 ℃，相对湿度误差为5%，海面风速误差为1.0 m/s，也可使蒸发波导高度诊断分析均方差小于蒸发波导高度10%。

表1 不稳定层结条件下气象水文要素随机扰动对蒸发波导高度影响

Table 1 Impacts of hydrological and meteorological elements perturbation on evaporation duct height in unstable stratification condition

	海面水温	气温	相对湿度	风速	气压	蒸发波导高度
均值	24.8 ℃	23.4 ℃	57%	3.66 m/s	1016.36 hPa	24.12 m
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	3%	0.5 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.28 m	0.47 m	0.75 m	2.02 m	0.01 m	2.21 m(9.2%)
要素均方差	0.5 ℃	0.5 ℃	3%	0.5 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.48 m	0.75 m	0.75 m	2.02 m	0.01 m	2.37 m(9.8%)
要素均方差	0.5 ℃	0.5 ℃	5%	0.5 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.48 m	0.75 m	1.28 m	2.02 m	0.01 m	2.67 m(11%)
	海面水温	气温	相对湿度	风速	气压	蒸发波导高度
均值	24.8 ℃	23.4 ℃	57%	10.0 m/s	1016.36 hPa	20.22 m
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	3%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.08 m	0.19 m	0.84m	0.51 m	0.01 m	1.06 m(5.2%)
要素均方差	0.5 ℃	0.5 ℃	3%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.20 m	0.35 m	0.84m	0.51 m	0.01 m	1.27 m(6.3%)
要素均方差	0.5 ℃	0.5 ℃	5%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.20 m	0.35 m	1.41m	0.51 m	0.01 m	1.77 m(7.3%)

表2是在假设海面气温为3.8 ℃、气压为1022.07 hPa、相对湿度为78.8%、海表面水温为2.0 ℃、风速为7.98 m/s条件下，以及假设海面气温为24.5 ℃、气压为1012.28 hPa、相对湿度为79.5%、海表面水温为24.2 ℃、风速为6.6 m/s条件下，利用蒸发波导诊断分析模型计算分析的单一要素随机扰动以及多个要素同时随机扰动对蒸发波导高度诊断分析误差的影响。表2中括号内百分数表示蒸发波导高度均方差与蒸发波导高度平均值之比。

由表2可以看出，在气温大于海温的稳定层结条件下，海面相对湿度是最敏感因子，其次是海面气温、海表面水温、海面风速；气压扰动影响可以忽略。在强稳定层结条件下，相对湿度代数值变化2%，可引起蒸发波导高度变化超出10%；在弱稳定层结条件下，相对湿度代数值变化3%，可使蒸发波导高度变化接近10%。若使蒸发波导高度诊断分析均方差小于蒸发波导高度10%，应要求气温和海表面水温误差不大于0.2 ℃，相对湿度误差不大于1%，

表2　稳定层结条件下气象水文要素随机扰动对蒸发波导高度扰动影响

Table 2　Impacts of hydrological and meteorological elements perturbation on evaporation duct height in stable stratification condition

	海面水温	气温	相对湿度	风速	气压	蒸发波导高度
均值	2.0 ℃	3.8 ℃	78.8%	7.98 m/s	1022.07 hPa	3.63 m
要素均方差	0.2 ℃	0.2 ℃	1%	0.5 m/s	1 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.17 m	0.13 m	0.27 m	0.02 m	0.00 m	0.33 m(9.2%)
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	2%	0.5 m/s	1 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.25 m	0.19 m	0.54 m	0.02 m	0.00 m	0.62 m(17%)
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	3%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.25 m	0.19 m	0.82 m	0.04 m	0.0 m	0.87 m(24%)
	海面水温	气温	相对湿度	风速	气压	蒸发波导高度
均值	24.2 ℃	24.5 ℃	79.5%	6.6 m/s	1012.28 hPa	13.08 m
要素均方差	0.2 ℃	0.2 ℃	1%	0.5 m/s	1 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.72 m	0.79 m	0.42 m	0.16 m	0.01 m	1.05 m(8.0%)
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	2%	0.5 m/s	1 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.78 m	0.89 m	0.85 m	0.16 m	0.01 m	1.54 m(11.8%)
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	3%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.78 m	0.89 m	1.30 m	0.44 m	0.01 m	2.0 m(15.3%)

海面风速误差不大于0.5 m/s。

表3是在假设海面气温为24.5 ℃、气压为1012.28 hPa、相对湿度为79.5%、海表面水温为24.5 ℃以及风速为6.6 m/s条件下,利用蒸发波导诊断分析模型计算分析的单一要素随机扰动以及多个要素同时随机扰动对蒸发波导高度的影响。表3中括号内百分数表示蒸发波导高度均方差与蒸发波导高度平均值之比。

表3　中性层结条件下气象水文要素随机扰动对蒸发波导高度扰动影响

Table 3　Impacts of hydrological and meteorological elements perturbation on evaporation duct height in neutral stratification condition

	海面水温	气温	相对湿度	风速	气压	蒸发波导高度
均值	24.5 ℃	24.5 ℃	79.5%	6.6 m/s	1012.28 hPa	12.2m
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	2%	0.5 m/s	1 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.66 m	0.79 m	0.78m	0.28 m	0.01 m	0.87 m(7.1%)
要素均方差	0.3 ℃	0.3 ℃	3%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.66 m	0.79 m	1.18m	0.62 m	0.01 m	1.35 m(11.1%)
要素均方差	0.5 ℃	0.5 ℃	3%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.80 m	1.01 m	1.18m	0.62 m	0.01 m	1.36 m(11.1%)
要素均方差	0.5 ℃	0.5 ℃	5%	1.0 m/s	2 hPa	综合影响
波导高度均方差	0.80 m	1.01 m	2.04m	0.62 m	0.01 m	2.16 m(17.7%)

同稳定层结相似,在中性层结条件下,海面相对湿度是最敏感因子,其次是海面气温、海表面水温、海面风速。相对湿度较小的变化,可导致蒸发波导高度产生显著变化。相对湿度代数值变化3%时,可使蒸发波导高度变化接近蒸发波导高度的10%。若使蒸发波导高度诊断分析均方差小于蒸发波导高度的10%,应要求气温和海表面水温误差不大于0.3 ℃,相对湿度误差不大于2%,海面风速误差不大于0.5 m/s。当气温和海表面水温误差为0.5 ℃、相对湿度误差为3%、海面风速误差为1.0 m/s时,蒸发波

导高度诊断分析均方误差与蒸发波导高度之比大于但接近10%；在相对湿度和海面风速探测误差不变条件下，将气温和海表面水温误差降低为0.3 ℃，则蒸发波导高度诊断分析均方误差与蒸发波导高度之比仍大于10%。

由于在开阔海域大部分时间内大气层结条件主要是不稳定层结和近中性层结，若蒸发波导探测系统中气温和海表面水温传感器探测误差不大于0.5 ℃，相对湿度探测误差不大于3%，低风速条件下海面风速探测误差不大于0.5 m/s，高风速条件下海面风速探测误差不大于1.0 m/s，则在开阔海域可使蒸发波导高度诊断分析误差在大部分时间内小于或接近于蒸发波导高度的10%。

4 结论

蒸发波导高度随海面气温与海表面水温之差、海面风速、相对湿度变化而变化。在高风速条件下，蒸发波导高度基本随海面气温与海表面水温之差代数值的增大而减小，但在低风速条件下，蒸发波导高度随海面气温与海表面水温之差代数值变化呈双峰分布。除稳定层结且风速较低条件外，海面相对湿度是影响蒸发波导高度变化的最敏感因子，蒸发波导高度基本随海面相对湿度增大而减小。

若使蒸发波导高度诊断分析均方差小于蒸发波导高度的10%，在稳定层结条件下，应要求气温和海表面水温探测误差不大于0.2 ℃，相对湿度探测误差不大于1%，海面风速探测误差不大于0.5 m/s；在中性层结下，应要求气温和海表面水温探测误差不大于0.3 ℃，相对湿度探测误差不大于2%，海面风速探测误差不大于0.5 m/s；在不稳定层结条件下，应要求气温和海表面水温探测误差不大于0.5 ℃，相对湿度探测误差不大于3%，风速较低时，海面风速误差不大于0.5 m/s；风速较大时，海面风速探测误差为1.0 m/s。

若蒸发波导探测系统中气温和海表面水温传感器探测误差不大于0.5 ℃，相对湿度传感器探测误差不大于3%，低风速条件下海面风速探测误差不大于0.5 m/s，高风速条件下海面风速探测误差不大于1.0 m/s，则蒸发波导探测系统在开阔海域蒸发波导高度诊断分析误差在大部分时间内小于或接近于蒸发波导高度的10%。

参考文献：

[1] 戴福山，李群，董双林，等. 大气波导及其军事应用[M]. 北京：解放军出版社，2002.

[2] 胥泽奇，张世艳，宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程，2012，9(1)：54—58.

[3] STEVEN M Babin，GEORGE S Young，JAMES A Carton. A New Model of the Oceanic Evaporation Duct[J]. Journal of Applied Meteorology，1997，36：193—204.

[4] IVANOV V K，SHALYAPIN V N，LEVADNYI Yu V. Determination of the Evaporation Duct Height from Standard Meteorological Data[J]. Atmospheric and Oceanic Physics，2007，43(1)：36—44.

[5] LUC Musson-genon，SYLVIE Gauthier，ERIC Bruth. A Simple Methold to Determine Evaporation Duct Height in the Sea Surface Boundary Layer[J]. Radio Science，1992，27(5)：635—644.

[6] GRACHEV A，ANDREAS E L，FAIRALL C W，et al. SHEBA Flux-profile Relationships in the Stable Atmospheric Boundary Layer[J]. Boundary-Layer Meteorology[J]. 2007，124：315—333.

[7] FAIRALL C W，BRADLEY F，ROGERS D P，et al. Bulk Parameterization of Air-sea Fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment[J]. Journal of Geophysics Research，1996，101(C2)：3747—3764.

[8] LIU W T，KATSAROS K B，BUSINGER J B. Bulk Parameterization of Air-sea Exchanges of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface [J]. Journal of the Atmospheric Science，1979，36(9)：1722—1735.