文章编号：1672-8785(2018)09-0027-07

基于模拟红外辐射的海雾监测应用研究

顾成明　陈　成

（中国卫星海上测控部，江苏 江阴　214431）

摘　要：由于长波红外及中波红外辐射受雾滴中水汽的影响明显，结合大气红外探测仪(Atmospheric Infrared Sounder，AIRS)的特征，利用快速辐射传输模式(Community Radiative Transfer Model，CRTM)分别模拟了两个波段的通道辐射信息。对下垫面辐射和模式上行辐射进行分析后发现：(1)为排除下垫面的干扰，将 CRTM 模式的底层上行辐射减去下垫面辐射，此时分离出的贴地面辐射值大小与海雾的强弱分布一致，因此可用于对海雾水平分布的监测。(2)模式上行辐射及其梯度随高度的变化反映了垂直方向上的海雾强度变化；通过对其进行分析可实现对海雾垂直结构的监测。(3)分别对中波红外和长波红外通道辐射进行模拟分析后发现，两者均可反映海雾的三维空间特性。

关键词：海雾；模拟；监测；水平分布；垂直结构

中图分类号：TP7　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2018.09.005

Research on Sea Fog Monitoring Based on Simulated Infrared Radiation

Gu Cheng-ming，Chen cheng

(*China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department，JiangYing 214431，China*)

Abstract：Because of the obvious affection of moisture from fog drops on long-wave and middle-wave infrared radiation，the channel radiation information in both bands is simulated respectively by using a Community Radiative Transfer Model (CRTM) according to the characteristics of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). After analyzing the underlying surface radiation and upwelling radiation from the model，it is found that 1) to exclude the distraction from the underlying surface，the underlying surface radiation can be subtracted from the bottom layer radiation in CRTM. At this time，the ground layer radiation presents the same distribution as the sea fog. Therefore，this method can be used to monitor the horizontal distribution of sea fog；2) the upwelling radiation and its gradient variation with altitude can reflect the intensity variation of sea fog in the vertical direction，which can be used to monitor the vertical structure of sea fog；3) After analyzing the simulated radiation in long-wave and middle-wave infrared bands，it is found that the channel radiation in both infrared bands can mirror the 3D spatial characteristics of sea fog.

Key words：sea fog；simulate；monitor；horizontal distribution；vertical structure

收稿日期：2018-06-27

作者简介：顾成明(1991-)，男，江苏江阴人，工程师，硕士，主要从事海洋气象学方面的研究。

E-mail：guchengming0407@163.com

0 引言

海雾是海面低层大气中的一种水汽凝结现象。由于水滴或冰晶(或二者皆有)的大量积聚，能见度会降至 1 km 以下[1]。海雾发生时的低能见度对航空、水运和沿海交通等有着巨大影响。在大范围海雾发生之后，第一时间获取其水平分布及垂直发展状况，识别出其强度的空间分布，可以为海上船舶规避雾区提供重要依据，对于海上航行安全具有重要作用。

国内外在海雾监测方面已有大量研究。例如，邓玉娇等人[2]根据现有的雾遥感监测理论，基于 MODIS 资料，采用多通道阈值判识法进行了南海白天雾监测。该方法利用 MODIS 的 1、2、18、20、31 通道数据分离了云、雾以及海表的相关信息。Bendix J 等人[3]利用 MODIS 传感器数据反演了低云和雾的厚度及高度，对白天陆面低云和雾进行了分离识别，实现了较高的正确率。邓玉娇等人[4]利用国产静止气象卫星 FY2E/VISSR 资料，基于海雾在 VIS、IR1、IR4 等通道的光谱特征，提出了一种白天海雾监测算法。李亚春等人[5]利用 GSM-5 卫星的可见光通道和长波红外通道数据，并根据云雾的纹理特征、运动规律以及消散趋势，对白天大雾进行了识别和监测，并取得了较好的效果。梁益同等人[6]基于典型个例，采用直方图分析法对雾在 FY-1D 卫星各通道的光谱特征进行了分析，并提出了一种将 FY-1D 卫星数据用于雾监测的方法。周红妹等人[7]利用不同时相可见光遥感图像的雾区反射率特征和规律，以及下垫面反射率与云雾反射率之间的相对关系，对不同时相图像雾区反射率的相对变化率进行了计算和分析，并自动生成了准雾区动态判别阈值。

在夜间雾监测方面，樊建勇等人[8]通过对夜间雾的 NOAA/AVHRR 红外光谱特征进行分析，建立了一种基于 NOAA/AVHRR 遥感数据的夜间雾遥感监测模型。为了提升夜间雾监测精度，Turner J 等人[9-11]结合 NOAA/AVHRR 数据，采用中波红外和长波红外波段双通道差值法对夜间雾区进行了识别。

本文结合中波红外及长波红外波段的辐射特性，利用 CRTM 快速辐射传输模式输出模拟红外辐射，然后通过对其进行分析来实现海雾监测。目前，该方法在国内外还未见报道。一方面，将模式底层上行辐射与下垫面上行辐射作差，排除下垫面的影响，分离出贴地面的大气辐射以用于海雾水平分布监测；另一方面，输出各模式层上行辐射，然后通过对其进行分析得出海雾的垂直变化规律，最终实现对海雾的三维监测。

1 原理介绍

如图 1 所示，AIRS 仪器共有 2378 个通道，其通道分布于地面至大气层顶的整个垂直空间，所以能够对大气进行高密度探测。无论

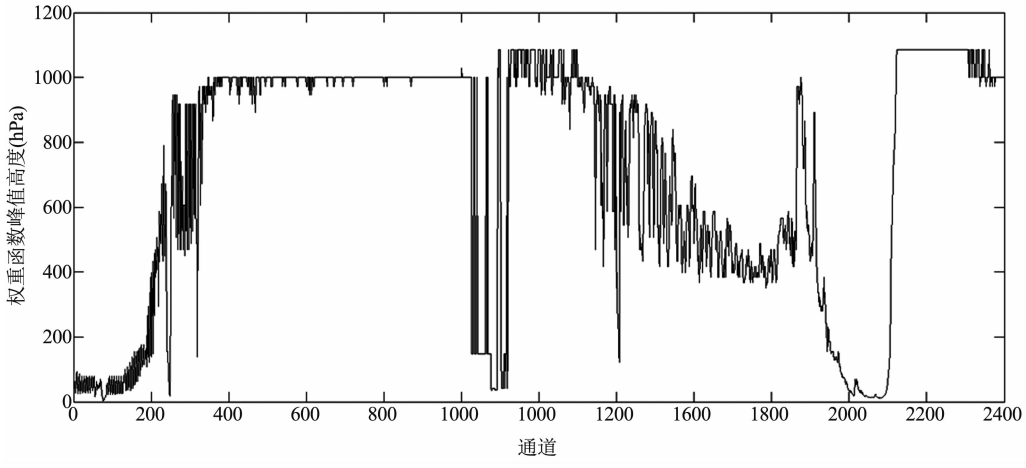


图 1 AIRS 各通道权重函数的峰值高度

是发射辐射还是反射辐射，卫星传感器接收到的总辐射都是两者的叠加。因此，下文将直接对总辐射值进行分析，其中并不涉及发射率或者比辐射率的问题。

式(1)为 CRTM 模式的基本大气辐射传输方程：

$$Rad_i^{tot} = \varepsilon_i \cdot B_i^{surf} \cdot \tau_i^{surf} + \int_{k=1}^{j} B_{k,i} \cdot d\tau_{k,i} + (1-\varepsilon_i) \cdot (\tau_i^{surf})^2 \cdot \int_{k=1}^{j} \frac{B_{k,j}}{(\tau_{k,i})^2} \cdot d\tau_{k,i} \quad (1)$$

式中，Rad_i^{tot} 为通道 i 接收的总辐射；等号右边的第一项表示下垫面辐射，第二项表示大气的辐射贡献，第三项表示下垫面的反射辐射；ε_i 为下垫面的发射率；B_i^{surf} 为下垫面的普朗克温度；τ_i^{surf} 为下垫面处的大气透过率；$B_{k,i}$ 为第 k 层大气的普朗克温度；$\tau_{k,i}$ 为第 k 层大气的透过率。

CRTM 模式首先对大气进行垂直分层；然后从太空背景辐射开始，采用逐层积分的方式向下积分，计算出到达下垫面的辐射值；接着从下垫面开始，逐层向上积分至卫星所在高度，计算出卫星接收的辐射值。前者称为下行辐射，后者称为上行辐射。

输出下垫面辐射后，将模式最底层的上行辐射与之相减，即可分离出贴地面的大气辐射。由于排除了下垫面的干扰，贴地面辐射是对最底层大气状态的最好反映，因此通过对其进行分析可实现海雾的水平监测。这样做能够直接从高度上排除低云对下层海雾监测的干扰，从而实现云雾分离。同时，通过对垂直方向的上行辐射进行分析，可以实现对海雾的垂直结构进行监测。

2 红外辐射要素与海雾监测

图 2(a)～图 2(d)为 2017 年 7 月 4 日 08 时至 11 时的日本 MTSAT 可见光卫星云图。可以看出，山东半岛南北以及辽东半岛东西两侧海域(黑色方框区域)的上方云层较淡，呈乳白色；随着时间的推移，海面背景色增强，可见 08 时这些区域存在明显的海雾。结合中国海洋大学区域大气与海洋短期实时预报系统预报(起报时间为 02 时)的 08 时雾区能见度(图 2(e))和水平能见度(图 2(f)，蓝色代表 1 km 以下区域)，山东半岛南北以及辽东半岛东西两侧海域(黑色方框区域)的能见度均为 1 km 左右，且分界线比较明显，可证明这些区域为海雾覆盖区。本文针对 2017 年 7 月 4 日 08 时的 AIRS 卫星资料，利用 CRTM 快速辐射传输模式输出的红外辐射要素识别雾区，并通过比对多层资料来描绘海雾的立体结构，从而实现对海雾的三维监测。

2.1 海雾的水平分布监测

卫星所接收的辐射主要包括物体(大气、下垫面等)的发射辐射和反射辐射。如上所述，不同的红外波段对于发射辐射和反射辐射的响应不同。中波红外波段的发射辐射远小于反射辐射，而长波红外波段的发射辐射远大于反射辐射。为了验证直接对两种波段的总辐射值进行分析时所得的结果是否一致，此处分别讨论 AIRS 中波红外和长波红外通道的辐射要素在海雾水平分布监测中的作用。

2.1.1 中波红外波段

图 3 所示为 AIRS 中波红外波段(2153 通道)所对应的下垫面辐射、模式底层上行辐射以及两者差值的分布情况。该波段以反射辐射为主。由于雾粒子的有效半径小，雾区反射辐射就强。图 3(a)中的下垫面辐射贡献主要来自于海表反射；图 3(b)中的模式底层上行辐射包括海表及其以上贴地面大气的辐射贡献；后者减去前者的差值就代表贴地面的大气辐射，其分布情况见图 3(c)。辐射大值区主要沿海岸线分布。渤海中北部及辽东半岛以东沿岸海域最大，在 0.6 以上；山东半岛南北两侧海域的辐射值次之，平均在 0.5 左右。与图 2 相比，该辐射值的分布与实际的雾区分布十分对应，能够达到监测海雾的目的。

2.1.2 长波红外波段

选取长波红外波段(528 通道)进行分析。图 4(a)所示为该通道接收的下垫面辐射，包括

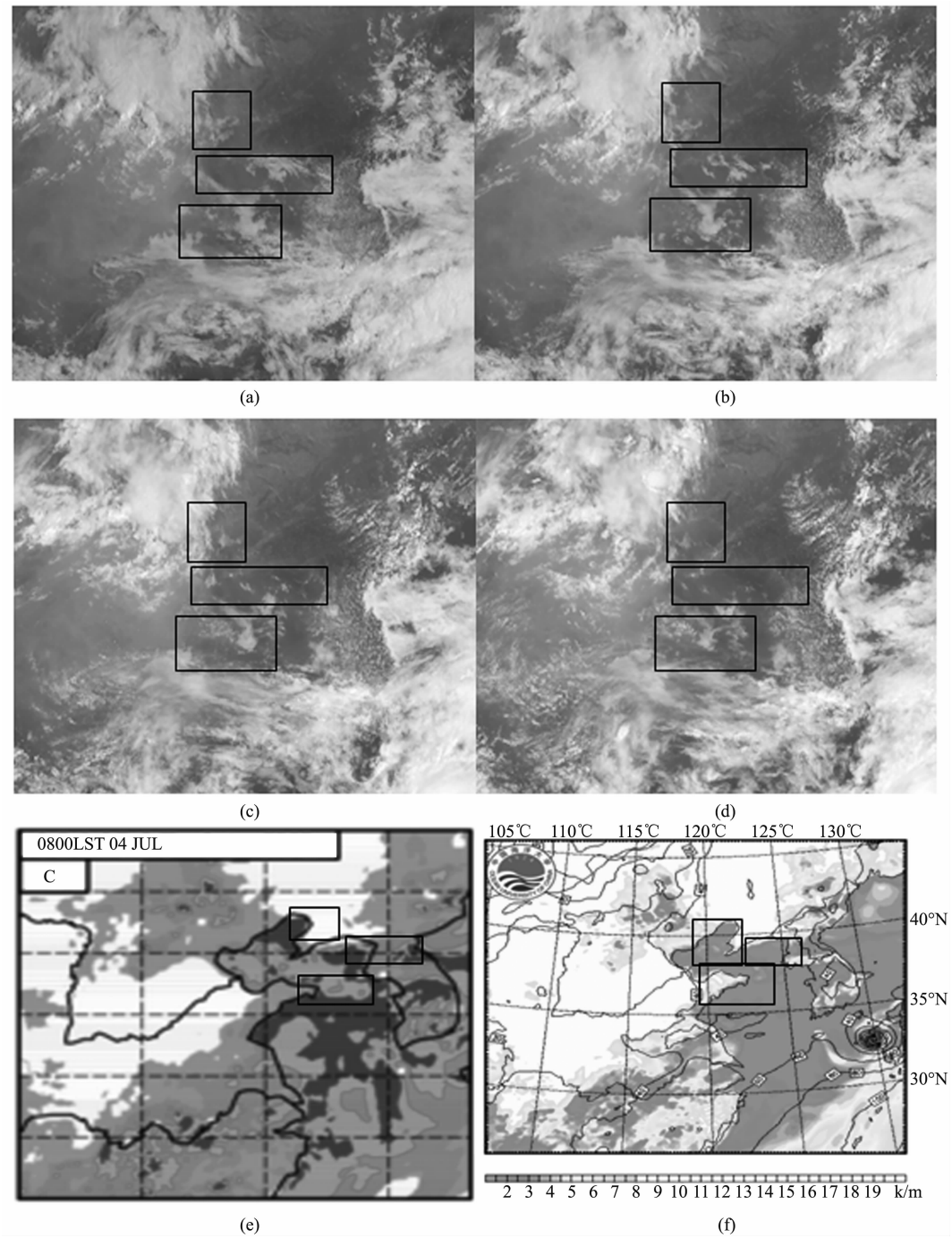


图 2 日本 MTSAT 可见光卫星云图：(a) 2017 年 7 月 4 日 08 时、(b) 2017 年 7 月 4 日 09 时、(c) 2017 年 7 月 4 日 10 时、(d) 2017 年 7 月 4 日 11 时；(e) 2017 年 7 月 4 日 08 时的预报雾区能见度；(f) 2017 年 7 月 4 日 08 时的预报水平能见度

下垫面的反射和发射辐射。图 4(b)所示为利用 CRTM 快速辐射传输模式得出的该通道在模式底层的上行辐射分布，同样包括模式层的反射和发射辐射。此处的下垫面为海平面，雾的影响较小，而 CRTM 模式底层输出的上行辐射包含下垫面及贴地面大气的辐射。通过对比图 4(a)和图 4(b)的分布状况，发现两图差别并不大。这主要是由于 CRTM 模式底层以下垫面辐射为主，贴地面的海雾所贡献的辐射相对较小。

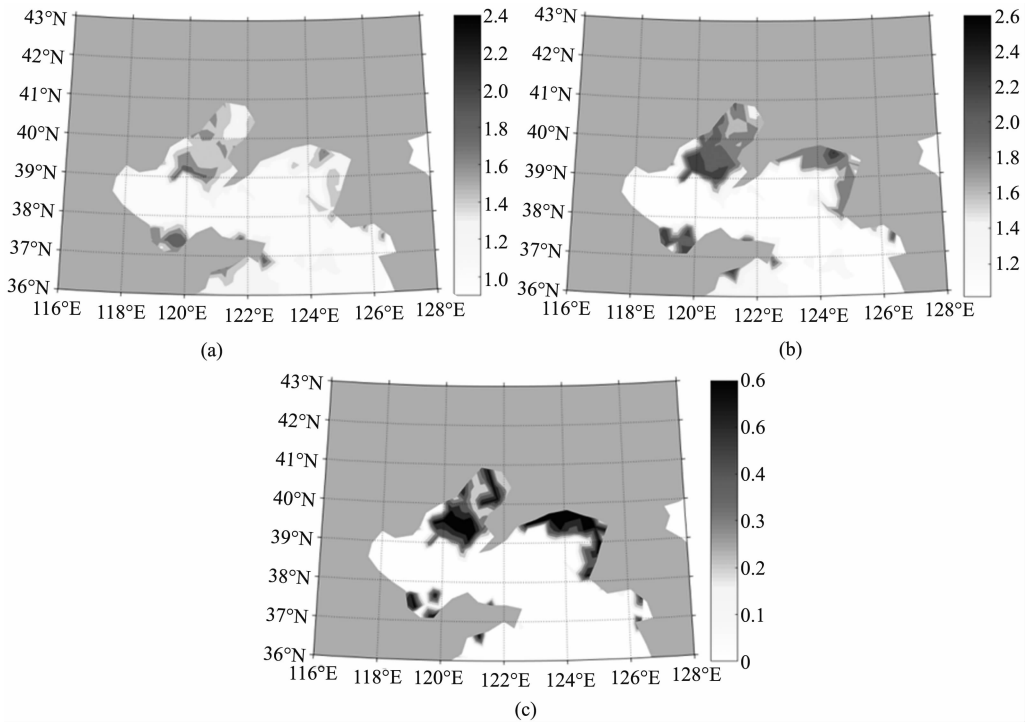


图 3 (a)下垫面的中波红外辐射分布；(b)模式底层大气的上行辐射分布；(c)两者差值分布

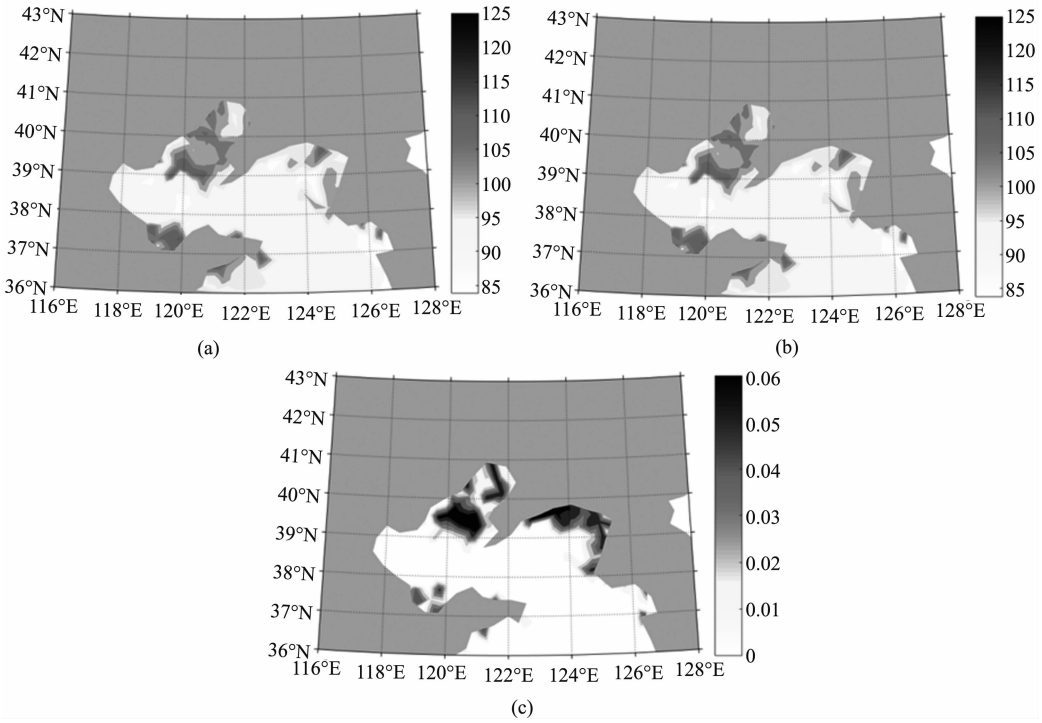


图 4 (a)下垫面的长波红外辐射分布；(b)模式底层大气的上行辐射分布；(c)两者差值分布

为了进一步分析其差别，图 4(c)给出了 CRTM 模式底层上行辐射与下垫面辐射的差值分布，以此将贴地面大气上行辐射与海平面辐射分离开来。长波红外波段以发射辐射为主。图中的辐射值主要来自于物体自身的发射辐射。图 4(c)经过分离之后，仅代表贴地面大气

辐射。由于排除了下垫面的干扰，其大值区与雾区具有较好的对应关系。可以看出，辐射大值区主要沿海岸线分布。渤海中北部最大，在0.06以上；其次是辽东半岛以东沿岸海域，均值为0.05；山东半岛南北两侧海域也存在辐射值较大的区域，平均在0.04左右。与图2相比，该辐射值的分布与实际的雾区分布十分对应，能够达到监测海雾的目的。

2.2 海雾的垂直结构监测

为了监测海雾的垂直结构，如图5所示，选取海雾强度最大的点a(39.54°N,120.64°E)、强度次之的点b(39.53°N,124.18°E)以及未监测出海雾的点c(37.18°N,124.03°E)，然后分析其上行辐射的垂直变化(结果见图6)。由于雾一般存在于大气底层，图6输出了CRTM模式中900 hPa以下的各模式层辐射。通过对比图6(a1)、图6(b1)、图6(c1)与图6(a2)、图6(b2)、图6(c2)两组图，发现其差别不大。由此可见，不论是中波红外通道还是长波红外通道，其输出的上行辐射均可用于海雾垂直结构监测。下面对图6(a2)、图6(b2)、图6(c2)进行具体分析。为方便论述，下文分别用a、b、c点指代。

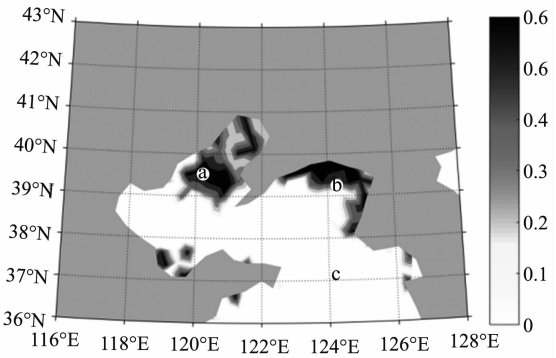


图5 海雾垂直结构监测的选点示意图

从图6中可以看出，a、b两点的上行辐射呈现出随高度上升而减小的变化状态。这是由于随着高度的增加，水汽减少，相应的发射及反射辐射减弱的缘故。a、b两处的雾底层浓、高层淡，其强度均随高度的上升而减弱。如图中所示，1000 hPa以上模式层的间隔增大，1000 hPa以下模式层较为密集，垂直分辨率高，因此以该高度为划分依据，点a处有四个模式层低于1000 hPa，而点b处有三个模式层低于1000 hPa。这就意味着a处的雾浓度大，垂直发展更深厚。从数值上看，点a处位于1000 hPa以下的四个模式层相差0.2，点b处位于1000 hPa以下的三个模式层相差0.01。由此可见，a处的雾垂直梯度大，其浓度随高度的上升变化明显；而b处的雾垂直梯度小，其浓度随高度的上升变化也较小。由于不存在雾，点c处上行辐射的垂直变化与a、b两处存在明显差别。在980 hPa以下，上行辐射值随高度的上升而减小；在980 hPa以上，上行辐射值随高度的上升而增大。这可能是由于上方有云存在，而CRTM模式底层的水汽含量较少，且随着高度的增加，水汽增多，上行辐射的贡献也增加。

3 结束语

本文利用CRTM快速辐射传输模式分别模拟了AIRS中波红外和长波红外通道的下垫面及上行辐射，并利用这些辐射要素对一次渤海海雾的水平分布及垂直变化情况进行了监测，得出了以下结论：

(1)中波红外和长波红外通道对于目标物发射及反射辐射的响应存在明显差异。本文利用其向上传递的总辐射监测海雾的水平分布与垂直结构，发现两种通道的辐射要素变化能够一致反映海雾的三维空间特性。

(2)CRTM模式底层辐射来自下垫面及其以上贴地面大气共同的辐射贡献。通过将此辐射值与输出的下垫面辐射贡献相减来滤除下垫面的影响，可分离出贴地面的大气辐射贡献，排除下垫面的干扰。对此差值分布进行分析后发现，其数值大小与海雾的强弱分布一致，可用于海雾水平范围的监测。

(3)输出不同强度雾区的上行辐射后发现，CRTM模式层在下垫面处分布密集，可用于海雾的垂直结构监测。通过对上行辐射值随高度上升的增减以及梯度变化进行分析，可得

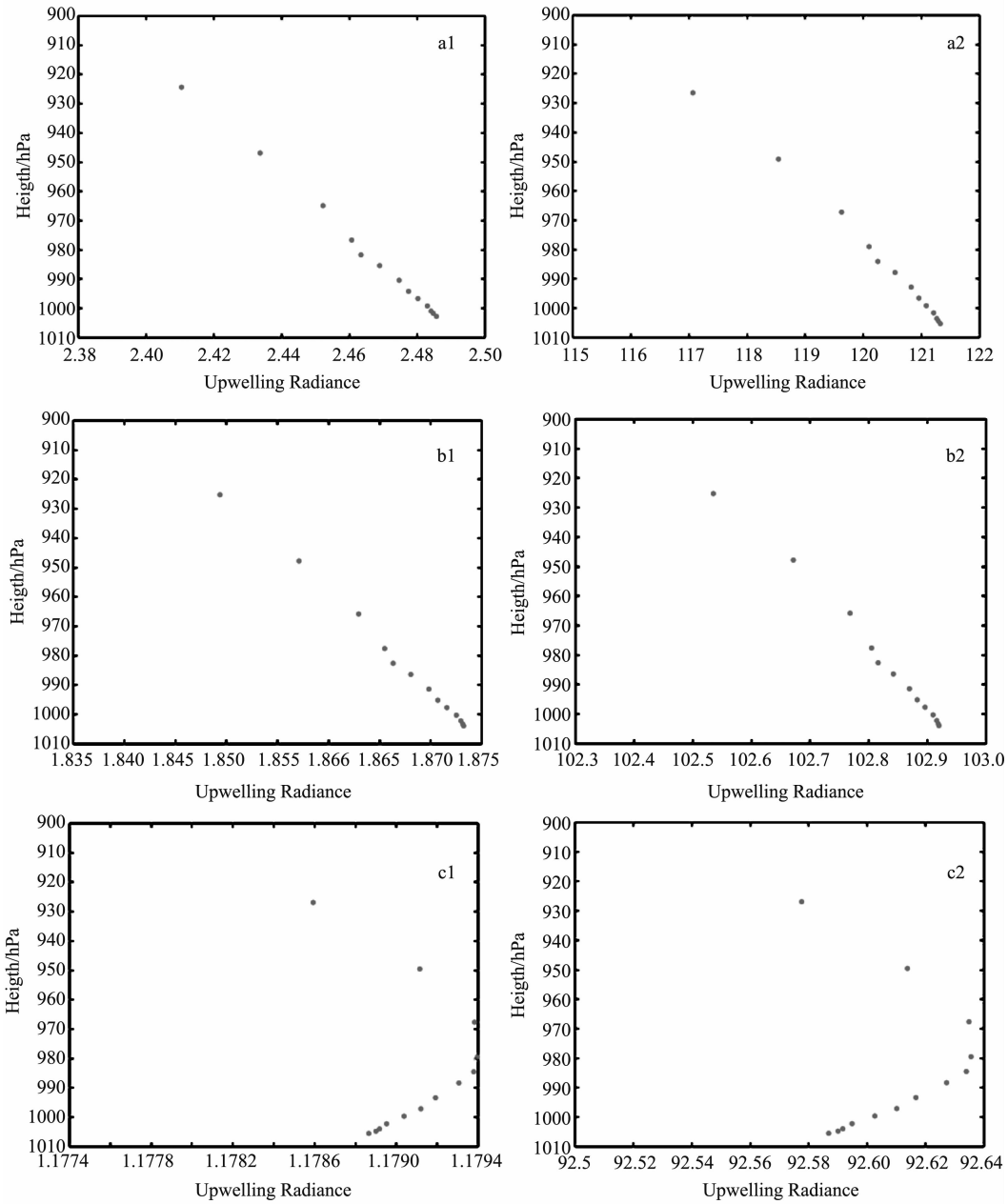


图 6　点 a 处的上行辐射(a1 2153 通道、a2 528 通道)，点 b 处的上行辐射(b1 2153 通道、b2 528 通道)以及点 c 处的上行辐射(c1 2153 通道、c2 528 通道)

出垂直方向上海雾强度的变化状况。结果表明，非雾区上行辐射与雾区上行辐射之间存在明显差异。

参考文献

[1] 王亚男，李永平. 冷空气影响下的黄东海海雾特征分析 [J]. **热带气象学报**，2009，**25**(2)：216-221.

[2] 邓玉娇，王捷纯，曹静. 基于 MODIS 遥感资料监测南海白天雾 [J]. **热带气象学报**，2013，**29**(6)：1046-1050.

[3] Bendix J，Thies B，Cermak J，et al. Ground Fog Detection from Space Based on MODIS Daytime Data-A Feasibility Study [J]. *Weather & Forecasting*，2005，**20**(6)：989-1005.

[4] 邓玉娇，田永杰，王捷纯. 静止气象卫星资料在白天海雾动态监测中的应用 [J]. **地理科学**，2016，**36**(10)：1581-1587.

（下转第 40 页）