

袁敏,段炼,平凡,等,2017. 基于 CloudSat 识别飞机积冰环境中的过冷水滴[J]. 气象,43(2):206-212.

# 基于 CloudSat 识别飞机积冰环境中的过冷水滴<sup>\* 1</sup>

袁 敏<sup>1,2,3</sup> 段 炼<sup>1</sup> 平 凡<sup>2</sup> 吴俊杰<sup>1</sup>

1 中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,广汉 618307

2 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

3 中国科学院大学,北京 100049

**提 要:** 利用 CloudSat 资料对 127 次积冰报告的积冰类型、云类、温度和过冷水含量进行统计分析,结果表明:大多数积冰发生在 $-20^{\circ}\text{C}$ 以上的温度环境中, $-20^{\circ}\text{C}$ 以下只发生了 4 次。明冰主要发生在 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ ;毛冰主要发生在 $-20\sim -10^{\circ}\text{C}$ ;混合冰主要发生在 $-15\sim -5^{\circ}\text{C}$ 。大多数积冰发生在层积云、雨层云和高层云中。过冷水含量随着温度降低而减少,并且过冷水含量的分布范围随着温度降低而变窄。2B-CWC-RO 产品垂直剖面上水凝物含量数据能较好地识别出层积云、高层云和雨层云中的过冷水,但未能识别 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下卷状云和对流云的过冷水。

**关键词:** CloudSat, 飞机积冰, 飞机报告, 过冷水

**中图分类号:** P426

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.008

## Identifying the Supercooled Liquid Water in Aircraft Icing Condition Using CloudSat Satellite Data

YUAN Min<sup>1,2,3</sup> DUAN Lian<sup>1</sup> PING Fan<sup>2</sup> WU Junjie<sup>1</sup>

1 College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract:** The statistic characteristics of 127 PIREPs (pilot reports) including icing type, cloud classification, temperature and supercooled liquid water content are investigated based on the CloudSat data. The results indicate that most of the aircraft icing events happened in the environment with temperature above  $-20^{\circ}\text{C}$ , only four appeared below  $-20^{\circ}\text{C}$ . Clear ice mainly occurs between  $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ , rime ice between  $-20\sim -10^{\circ}\text{C}$ , and mixed ice between  $-15\sim -5^{\circ}\text{C}$ . Most aircraft icing happens in the stratocumulus (Sc), altostratus (As), and nimbostratus (Ns). The supercooled liquid water content and its distribution decrease with decreasing temperature. 2B-CWC-RO product can identify the supercooled liquid water in the Sc, As and Ns, but it can't identify the supercooled liquid water in cirriform cloud and convective cloud when temperature is below  $-20^{\circ}\text{C}$ .

**Key words:** CloudSat, aircraft icing, pilot reports, supercooled liquid water

## 引 言

飞机积冰是指飞机机身表面某些部位积聚冰层

的现象,是由于云中或降水中的过冷水碰到机体后冻结而成的(牛生杰等,2011;陈百炼等,2014)。飞机积冰严重危害飞行安全,它能使飞机的空气动力学性能恶化,表现为升力减小,阻力增大,影响飞机

\* 国家自然科学基金民航联合研究基金(U1333130)和中国民用航空飞行学院重点项目(ZJ2014-02)共同资助  
2015 年 12 月 1 日收稿; 2016 年 8 月 4 日收修定稿  
第一作者:袁敏,从事航空气象和飞行气象环境的研究. Email: yuanm@aliyun.com

的稳定性和操纵性,甚至会导致机毁人亡的恶性事故(章澄昌,2008)。据统计,1982—2000年,共有800多人死于与飞机积冰有关事故(Bellucci et al, 2007)。飞机主要采用电热、气热和气动的方式防冰除冰,并避让潜在积冰的环境。随着我国通用航空飞速发展以及低空逐渐开放,飞机遭遇积冰的机会必然会增多。另外,近几年来由于国产大飞机计划的推进以及自然积冰条件下试飞的开展,因此飞机积冰的研究仍引起了诸多部门的重视。

目前,对过冷水或飞机积冰的研究手段主要有飞机探测、数值模拟和卫星资料诊断等方法(周悦等,2014;刘涛等,2015)。其中卫星遥感资料能在较大范围内对积冰区域进行实时和连续的观测,具有其他方法不能比拟的优越性。Curry and Liu (1992)利用多种卫星资料的多光谱数据识别积冰区内云顶的云水含量、云光学厚度等特征。Ellrod and Bailey(2007)用 GOES 卫星资料诊断出积冰趋势和积冰顶部高度。王新炜等(2003)利用 MODIS 卫星资料反演出积冰区域云的光学厚度、有效粒子半径。王磊等(2014)基于卫星等数据建立了飞机积冰潜势监测算法。此外,卫星遥感资料也被应用于美国联邦航空局开发的积冰潜势预报系统中,是飞机积冰监测和识别的主要手段(Bernstein et al, 2005)。

以前的研究大多通过卫星的可见光、红外和微波等信息反演出积冰区域内云的微物理信息,而缺少对云结构特征的直接探测,由此反演出的数据分辨率较低、精度较差。CloudSat 卫星的发射改变了这种状况,CloudSat 卫星是第一颗可以对云层特征进行全球观测的卫星,其搭载的 94 GHz 毫米波云廓线雷达能够“切开”云层,获得云的垂直结构信息,实现对不同厚度云层及不同特征云系的垂直观测,从而大大提升了卫星探测的云微物理信息的精确度。因此,本文利用 CloudSat 卫星资料和飞机报告中提供的飞机积冰的位置和高度信息,针对发生飞机积冰的几种典型云状,对云内温度、过冷水等物理量的特征进行识别。

## 1 资料和方法

### 1.1 CloudSat 卫星资料

CloudSat 卫星有两类数据产品:一类是标准数据产品,另一类是辅助数据产品。标准数据产品分

为两级,一级产品是通过卫星上搭载的云雷达直接得到的数据产品,二级产品是根据一级产品并结合其他卫星产品反演得到的。本文主要用到了二级标准数据产品 2B-GEOPROF、2B-CWC-RO 和 2B-CLDCLASS-LIDAR 以及欧洲中心中尺度天气预报辅助产品 ECMWF-AUX。其中 2B-GEOPROF 产品包括了雷达反射率因子的信息;2B-CWC-RO 产品提供垂直剖面上水凝物的含量、数浓度和有效半径等信息;ECMWF-AUX 提供了卫星探测路径上的气压、温度和湿度等要素的信息,是由 ECMWF 的全球数据插值到观测点上所得。

### 1.2 飞机报告资料

飞机报告又称为飞行员报告(PIREPs),是飞机遭遇积冰、颠簸等天气时将所遭遇天气的时间、地点、飞行高度层以及强度等信息进行编码后向地面发布的电报(表 1)。飞机报告中包含了积冰发生的时间、位置、高度和强度等信息,是研究飞机积冰和判据飞机积冰是否发生的重要资料(Bernstein et al, 1997; Tafferner et al, 2003)。由于目前国内相关机构对飞机报告的管理比较严格,资料尚未对外公开,本文搜集了美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的发生在美国的飞机积冰报告。

表 1 飞机积冰报告说明

Table 1 The illustration of aircraft icing report

报告项目	报告内容
报文	OMA UA /OV OMA130015/TM 1910/FL130/TP PA27/TA M10/IC MOD RIME
时间	1910z07 Apr 2014
机型	PA27
位置	41.1425°N,95.6403°W
高度	13,000 ft(约 3900 m)
积冰类型	中度毛冰

### 1.3 方法

根据飞机报告中积冰发生的位置和时间,结合 CloudSat 卫星的轨道数据,统计出在卫星轨道附近一共发生了 127 次飞机积冰的个例。利用 CloudSat 数据产品对这些个例的积冰类型、云类、温度和过冷水含量进行统计分析,在评估了各类云的积冰环境的基础上,重点识别了各类云中的过冷水,以检验 CloudSat 数据产品对各类云积冰环境探测的可靠性。

## 2 积冰环境参数统计分析

根据飞机积冰报告中的信息以及 CloudSat 产品的云分类数据和温度数据,统计出积冰种类和云类在不同温度范围内的次数(表 2)。统计发现大多数积冰发生在  $-20^{\circ}\text{C}$  以上的温度环境中,其中  $-15^{\circ}\text{C}$  ~  $-10^{\circ}\text{C}$  范围的次数最多,有 37 次;而温度在  $-20^{\circ}\text{C}$  以下只发生了 4 次。对不同积冰种类发生次数的统计结果显示,18 次明冰发生在  $-5^{\circ}\text{C}$  ~  $0^{\circ}\text{C}$ ,并随着温度降低而减少;毛冰则多数发生在  $-15^{\circ}\text{C}$  ~  $-10^{\circ}\text{C}$ ,但从发生次数占总次数的比例来看,发生在  $-20^{\circ}\text{C} < T \leq -15^{\circ}\text{C}$  的毛冰比例最高,有 13 次;而混合冰主要发生在  $-15^{\circ}\text{C} < T \leq -5^{\circ}\text{C}$ ,共 28 次。以上积冰种类的统计结果符合积冰种类的发生规律,即在较高温度下容易出现明冰,而在较低温度下,容易发生毛冰。对发生积冰的云类统计发现,大

多数积冰发生在低云和中云中,其中层积云 44 次,雨层云 26 次,高层云 49 次;对流云积冰 6 次,高云仅 2 次。从积冰在不同云类中的温度可看出,大部分层积云和雨层云积冰发生在  $-15^{\circ}\text{C}$  以上的环境中,而大部分高层云积冰温度在  $-20^{\circ}\text{C}$  ~  $-5^{\circ}\text{C}$  范围内;对流云积冰在  $0^{\circ}\text{C}$  以下的温度中都有发生,其中  $-20^{\circ}\text{C}$  以下的温度中有 2 次;高云积冰有 2 次发生在温度  $-20^{\circ}\text{C}$  以下。

为了分析积冰环境中的微物理参数,利用 CloudSat 产品的温度数据及云水含量数据对 127 次积冰进行诊断,其中有 80 次积冰的云水含量数据缺测,将其余 47 次积冰的云类归纳为层积云、层状云(包括雨层云、高层云、高云)和积状云 3 类,并统计出过冷水含量和温度的散点图(图 1)。由图 1 可看出,总体而言,过冷水含量随着温度降低而减少,并且过冷水含量的分布范围随着温度降低而变窄,即在  $-5^{\circ}\text{C}$  ~  $0^{\circ}\text{C}$  温度范围内,过冷水含量分布范围较

表 2 不同温度范围、积冰种类、云类的积冰次数统计表

Table 2 Statistics of aircraft icing times in different temperature ranges, icing types and cloud types

温度	次数	种类			云类				
		明冰	毛冰	混合冰	层积云	雨层云	高层云	对流云	高云
$-5^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$	33	18	5	10	18	11	3	1	
$-10^{\circ}\text{C} < T \leq -5^{\circ}\text{C}$	34	12	7	15	13	8	12	1	
$-15^{\circ}\text{C} < T \leq -10^{\circ}\text{C}$	37	8	16	13	9	7	20	1	
$-20^{\circ}\text{C} < T \leq -15^{\circ}\text{C}$	19	2	13	4	4		14	1	
$T \leq -20^{\circ}\text{C}$	4	0	4	0				2	2

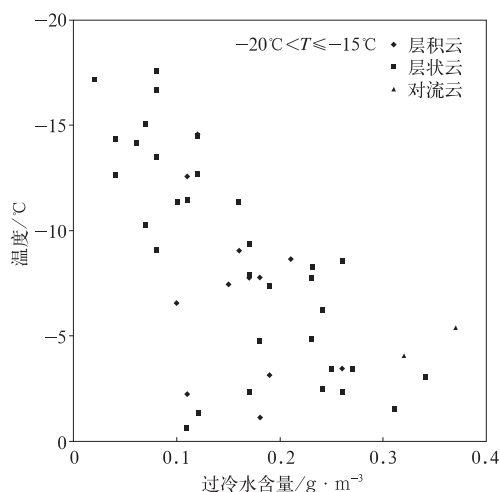


图 1 47 次积冰的过冷水含量-温度散点图

Fig. 1 Scatter plot of supercooled liquid water content and temperature for 47 aircraft icing reports

广,数值在  $0.1 \sim 0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $-10^{\circ}\text{C}$  ~  $-5^{\circ}\text{C}$  温度范围内,过冷水含量主要集中在  $0.1 \sim 0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;当温度在  $-15^{\circ}\text{C}$  ~  $-10^{\circ}\text{C}$  时,过冷水含量主要分布在  $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以下;当温度  $-20^{\circ}\text{C}$  ~  $-15^{\circ}\text{C}$  之间时,过冷水含量在  $0.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以下。值得注意的是,CloudSat 产品的云水含量数据均没有识别出温度低于  $-20^{\circ}\text{C}$  时 4 次积冰的过冷水。

## 3 CloudSat 对不同云类的飞机积冰环境识别

根据以上对 47 次积冰的云类统计可知,将积冰的云类归纳为层积云、层状云和积状云 3 类,下文将选取若干个例对各类云的积冰环境进行检验,并对云中的过冷水进行识别,检验 2B-CWC-RO 产品对各类云积冰环境探测的可靠性。

### 3.1 层积云积冰

根据上文统计,发生在层积云中的积冰一共有44次,其中32次液水含量数据缺测,对12次有液水含量数据的统计可看出(图1),层积云积冰的温度在 $-15\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,过冷水含量在 $0.1\sim 0.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间。选取其中一次作为研究(个例1)。图2a显示了CloudSat卫星轨迹(黑色实线)和飞机积冰报告点的位置(加号),飞机积冰报告的时间为2014年4月11日19:23(世界时,下同),卫星经过报告点附近的时间为19:08,两者的位置和时间都很接近,因此CloudSat卫星数据能表征积冰发生点的数据信息。图2b为卫星雷达反射率因子的垂直剖面,由图可看出,积冰报告点(加号)位于云层中部,高度约为2500 m。从云分类产品可知, $45^{\circ}\text{N}$ 处为对流云,而积冰所在的云为层积云。图1c、1d分别为液水含量和冰水含量的垂直剖面,由图可知,液水含量在底部多顶部少,而冰水含量底部少顶部多,云底温度接近 $0^{\circ}\text{C}$ 。积冰点位于 $0^{\circ}\text{C}$ 和 $-20^{\circ}\text{C}$ 等温线之间,过冷水

含量约 $0.17\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。液水含量图中(图1c)出现了灰色的异常值,这是由于2B-CWC-RO产品算法中考虑到降水对回波衰减的影响较大,当回波强度 $> -15\text{ dBz}$ 时,表明无法得出正确的液水含量数据,因此数据存在异常。因此,CloudSat数据能够识别出12次层积云积冰的云中过冷水。

### 3.2 层状云积冰

发生在层状云中的积冰一共有77次,其中44次液水含量数据缺测,对33次有液水含量数据的统计可看出(图1),层状云积冰的温度范围在 $-18\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,过冷水含量在 $0\sim 0.35\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。选取一次典型的锋面云系为例(个例2),该锋面云系从低到高由雨层云、高层云和卷状云组成。如图3a,卫星轨道附近有5次飞机积冰报告,报告时间在2014年4月8日18:40—19:00,卫星经过的时间为18:36。从雷达反射率因子垂直剖面图(图3b)显示云层从地面到高空向高纬度一侧倾斜,图3c中等温线的坡度较大,因此这几次飞机积冰发生在锋面系统的层

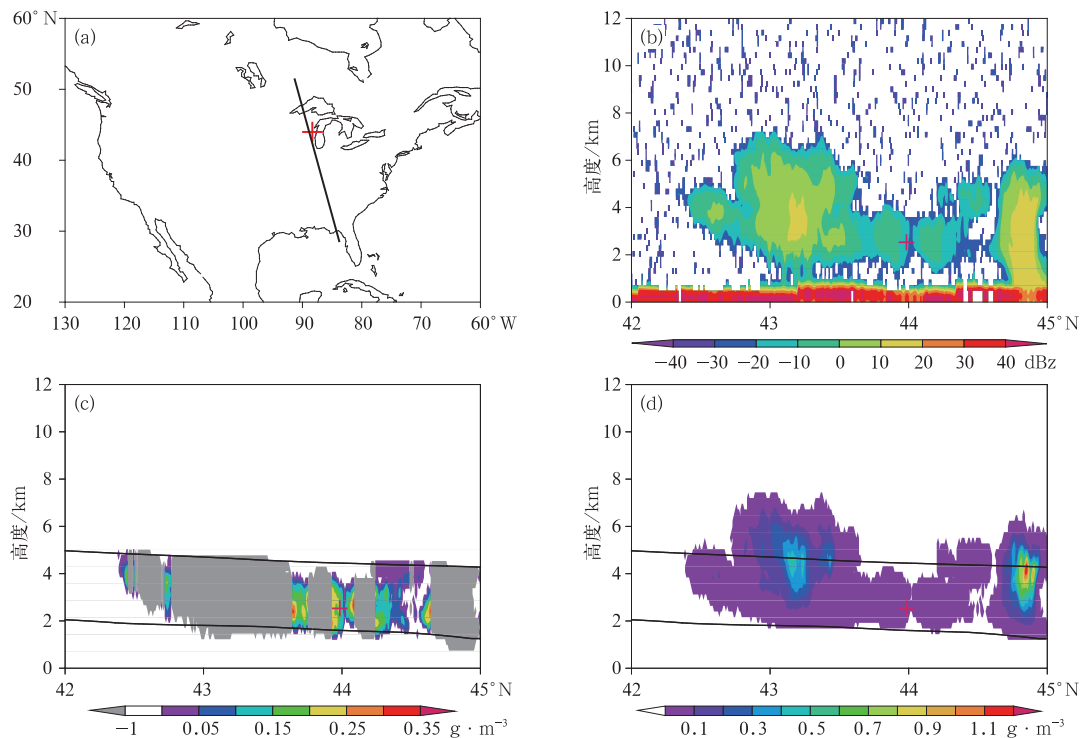


图2 个例1的(a) Cloud卫星轨迹(实线)和积冰报告点(加号),沿着卫星轨迹的垂直剖面的雷达反射率因子(b,单位: dBz)、液水含量(c,单位:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和冰水含量(d,单位:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )  
 Fig. 2 The orbit of CloudSat (solid line) and the location of PIREP (plus sign) (a); the vertical cross-section of radar reflectivity (b, unit: dBz), liquid water content (c, unit:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), and ice water content (d, unit:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) of Case 1

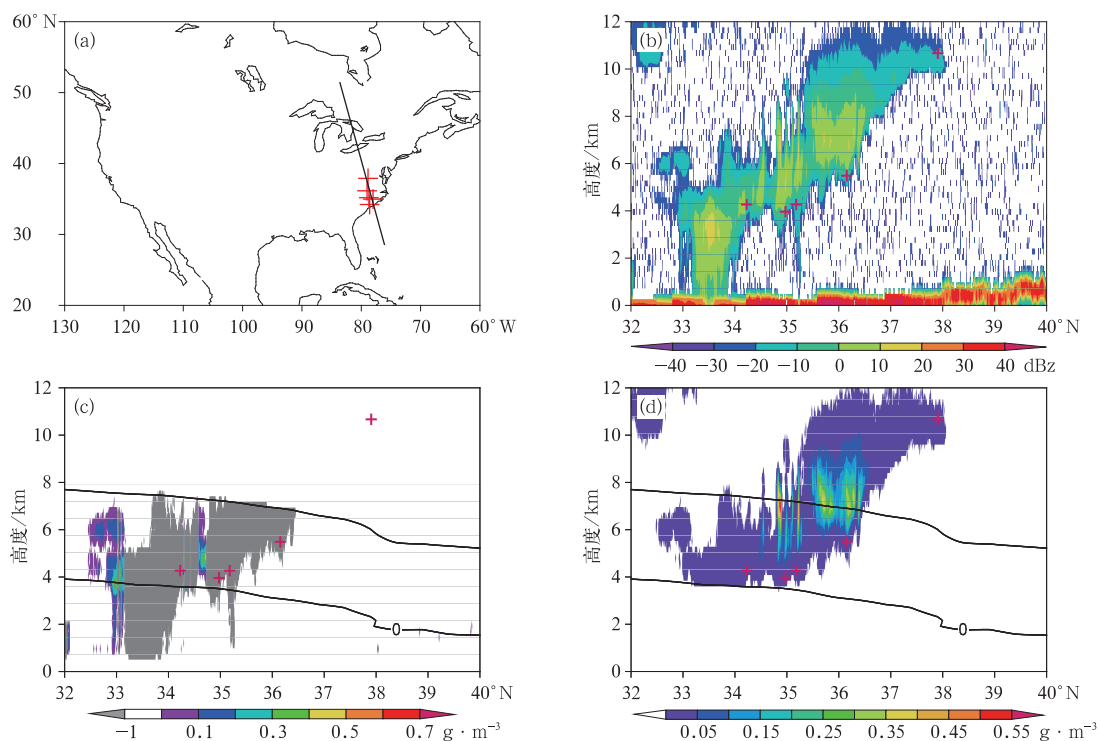


图 3 同图 2 但为个例 2

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Case 2

状云中。从云分类产品中可知,  $33^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$  为雨层云,  $34^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$  为高层云,  $37^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$  为卷状云。由于雨层云中温度在  $0^{\circ}\text{C}$  以上, 因此没有积冰发生, 而有 4 次积冰发生在较低的高层云中, 1 次发生在较高的卷状云中。分析液水含量的垂直剖面图(图 3c)发现, 4 次发生在高层云中的飞机积冰都有过冷水存在, 但由于发生在灰色的异常值区域, 因此无法得出确切的数据, 其中 3 次发生的高度约 4 km, 距离  $0^{\circ}\text{C}$  等温层较近, 另外一次离  $-20^{\circ}\text{C}$  等温层较近, 高度约 6 km。而对于发生在卷状云中飞机积冰, 由于高度较高, 过冷水含量很少, CloudSat 卫星资料没有识别出其中的过冷水。

### 3.3 对流云积冰

由于飞机一般不会有意识地穿过对流云区, 因此本文搜集到的对流云积冰仅有 6 次, 有液水含量数据的仅 2 次, 从图 1 的统计发现, 2 次积冰发生的温度在  $-5^{\circ}\text{C}$  左右, 过冷水含量在  $0.3\sim 0.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从表 2 对对流云积冰的温度统计发现, 有 2 次积冰发生的温度低于  $-20^{\circ}\text{C}$ , 现选取一次温度低于  $-20^{\circ}\text{C}$  的积状云积冰为例(个例 3)。如图 4a,

CloudSat 卫星轨迹附近发生了一次飞机积冰报告, 飞机积冰报告的时间为 2014 年 4 月 14 日 19:47, 卫星经过报告点附近的时间为 19:35。从图 4b 看出飞机积冰发生的高度较高, 在 8 km 附近, 雷达反射率因子的值在  $0\sim 10\text{ dBz}$ 。液水含量的垂直剖面图(图 4c)显示积冰发生的高度在  $-20^{\circ}\text{C}$  等温线以上, 该等温线之上水滴含量为 0, CloudSat 卫星资料未能在该高度层上识别出过冷水的存在。

由本次积冰个例和个例 2 中的卷状云积冰发现, 当积冰发生在  $-20^{\circ}\text{C}$  以下的温度时, Cloudsat 的云水含量产品无法识别出其中的过冷水含量, 由以上 3 个个例的云水含量图也发现在  $-20^{\circ}\text{C}$  等温线以上云水含量为 0。CloudSat 卫星对  $-20^{\circ}\text{C}$  以下的云水识别缺陷是由于其反演方法造成的(Austin, 2007; Austin et al, 2001; 2009), 由于卫星的云廓线雷达并不能区分出云的相态, 云水含量产品运用了 ECMWF 辅助产品资料中的温度阈值来区分液态和固态。当温度  $> 0^{\circ}\text{C}$  时, 云水含量中的液水含量占 100%, 冰水含量占 0%; 当温度低于  $-20^{\circ}\text{C}$  时, 云水含量中的液水含量占 0%, 冰水含量占 100%; 当温度介于  $-20\sim 0^{\circ}\text{C}$  时, 液水含量和冰水含量呈线性分布。

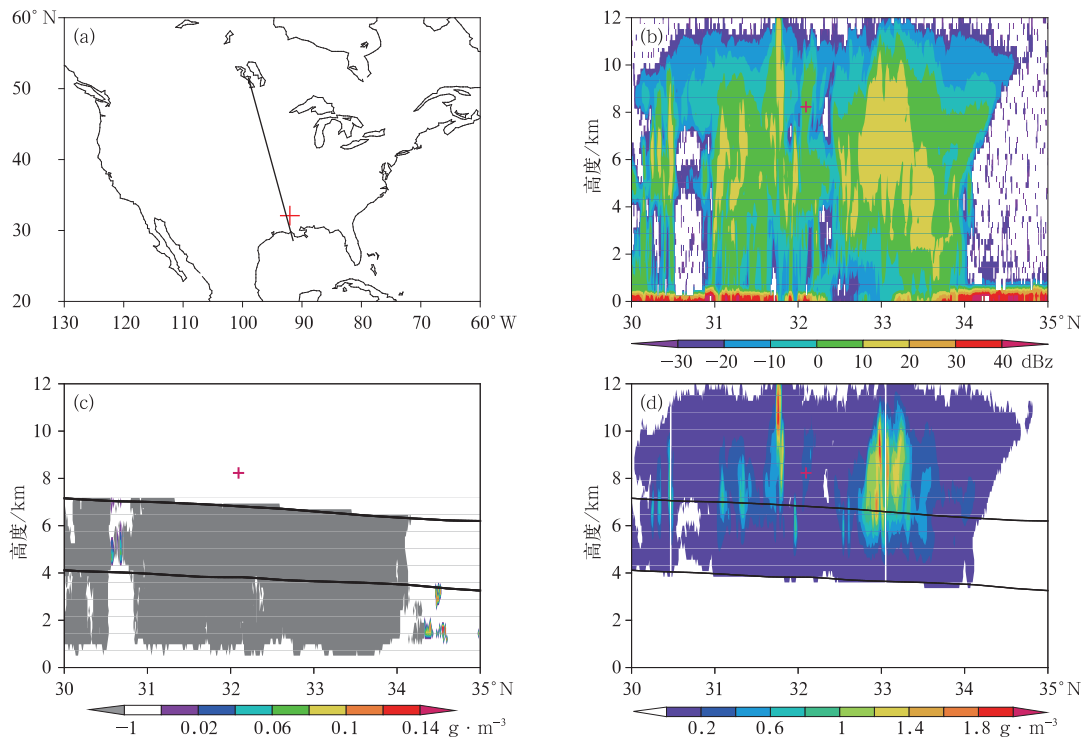


图4 同图2,但为个例3

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for Case 3

## 4 结论和讨论

(1) 对127次积冰报告提供的积冰环境参数进行统计,结果表明:大多数积冰发生在 $-20^{\circ}\text{C}$ 以上的温度环境中, $-20^{\circ}\text{C}$ 以下只发生了4次。明冰主要发生在 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ ;毛冰主要发生在 $-20\sim -10^{\circ}\text{C}$ ;混合冰主要发生在 $-15^{\circ}\text{C} < T \leq -5^{\circ}\text{C}$ 。大多数积冰发生在低云和中云中,其中层积云44次,雨层云26次,高层云49次;对流云积冰6次,高云仅2次。过冷水含量随着温度降低而减少,并且过冷水含量的分布范围随着温度降低而变窄。

(2) CloudSat 卫星 2B-CWC-RO 数据产品能够较好地识别出12次层积云和33次高层云、雨层云以及2次对流云积冰环境中的过冷水。

(3) 2B-CWC-RO 数据产品未能识别出 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下卷状云和对流云中的过冷水。对卷状云而言,大部分都不存在过冷水,因此仅有2次报告有积冰。并且卷状云的云滴浓度低,尺度小,回波强度已低于云雷达的最小可测功率;对对流云而言,由于其液水含量反演方法的限制,以及降水对回波衰减的影响

较大,造成计算结果的很大不确定性,作为数据质量控制的手段,将回波强度 $> -15\text{ dBZ}$ 的数据标为灰色的异常值。因此2B-CWC-RO数据产品未能识别出这些云中的过冷水。

(4) 在127次积冰报告,对流云积冰的次数仅6次,占总积冰次数的比例较低,但由于对流云中过冷水含量大,积冰速率快,其危害不容小视,很多由积冰导致的飞行事故发生在几分钟到十几分钟的对流云中。

## 参考文献

- 陈百炼,吴战平,张艳梅,等,2014. 贵州冬季电线积冰及其天气成因分析[J]. 气象,40(3):355-363.
- 刘涛,孙晶,周毓荃,等,2015. 一次低槽冷锋层状云系结构和过冷水分布特征的模拟研究[J]. 气象,41(10):1232-1244.
- 牛生杰,周悦,贾然,等,2011. 电线积冰微物理机制初步研究:观测和模拟[J]. 中国科学:地球科学,41(12):1812-1821.
- 王磊,李成才,赵增亮,等,2014. 飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J]. 气象,40(2):196-205.
- 王新炜,白洁,刘健文,等,2003. SBDART 辐射传输模式及其在飞机潜在积冰区反演中的应用[J]. 气象科技,31(3):152-155.
- 章澄昌,2008. 飞行气象学[M]. 北京:气象出版社:159-160.
- 周悦,周月华,牛生杰,等,2014. 云中积冰过程微物理参量演变规律

- 的数值模拟[J]. 大气科学学报, 37(4):441-448.
- Austin R T, Heymsfield A J, Stephens G L, 2009. Retrieval of ice cloud microphysical parameters using the CloudSat millimeter-wave radar and temperature[J]. *J Geophys Res*, 114 (D8): 1065-1066.
- Austin R T, Stephens G L, 2001. Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter-wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat; 1. Algorithm formulation[J]. *J Geophys Res*, 106(D22): 28233-28242.
- Austin R T, 2007. Level 2B radar-only cloud water content (2BCWC-RO) process description document[Z]. CloudSat Project Report, 24.
- Bellucci M, Vernillo P, Auletta A, et al, 2007. SONACA icing Test Campaign on a 2D model at CIRA IWT[Z]. SAE Technical Paper, 2007-01-3335. DOI:10.4271/2007-01-3335.
- Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, 2005. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations[J]. *J Appl Meteor*, 44(7):969-986.
- Bernstein B C, Omeron T A, McDonough F, et al, 1997. The relationship between aircraft icing and synoptic-scale weather conditions[J]. *Wea Forecasting*, 12(4):742-762.
- Curry J A, Liu G, 1992. Assessment of aircraft icing potential using satellite data[J]. *J Appl Meteor*, 31:605-621.
- Ellrod G P, Bailey A A, 2007. Assessment of aircraft icing potential and maximum icing altitude from geostationary meteorological satellite data[J]. *Wea Forecasting*, 22(1):160-174.
- Tafferfer A, Hauf T, Leifeld C, et al, 2003. ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments [J]. *Wea Forecasting*, 18(2):184-203.