

基于微波辐射计的旅顺大雾过程监测

刘 成

中国人民解放军91913部队, 辽宁 大连
Email: lc5097@163.com

收稿日期: 2020年11月7日; 录用日期: 2020年11月23日; 发布日期: 2020年11月30日

摘 要

本文利用MP-3000A型地基微波辐射计探测数据分析了2018年6月30日至7月6日辽宁旅顺地区黄海近岸5次大雾过程, 结果表明: 这5次大雾过程出现在当地时间的下午至次日早晨的稳定边界层内; 底层大气高水汽密度($>15 \text{ g/m}^3$)和近地面层的弱湍流为大雾的产生提供了背景条件; 500 m以下高度气温的降低, 促使底层水汽向液态水转化, 进而形成了大雾; 大雾的消散与底层大气升温、对流边界层的发展相联系。

关键词

地基微波辐射计, 大雾过程, 监测分析

The Fog Monitoring Based on Ground-Based Microwave Radiometer in Lvshun

Cheng Liu

Unit No.91913 of PLA, Dalian Liaoning
Email: lc5097@163.com

Received: Nov. 7th, 2020; accepted: Nov. 23rd, 2020; published: Nov. 30th, 2020

Abstract

The paper analyzes the five fog processes from 2018/6/30 to 2018/7/6 near the Yellow Sea in Lvshun based on MP-3000A Ground-based Microwave Radiometer. It is found that the fog appears in the stable atmospheric boundary layer from the afternoon to the morning of the next day, and the high water vapor density ($>15 \text{ g/m}^3$) in the bottom and the weak turbulence near the surface provide a background for the generation of the fog, and the decrease in temperature below 500 m promotes the conversion from water vapor to liquid water and forms the fog, and the dissipation

of the fog is related to the warming of the bottom atmosphere and the development of the convective boundary layer.

Keywords

Ground-Based Microwave Radiometer, Fog Process, Monitoring Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雾是指大量微小水滴或冰晶悬浮在贴地层空气中,使水平能见度小于 1 km 的天气现象。雾对人类活动和环境有重大影响,特别是海雾,全世界大部分海上事故都是在浓雾中发生的。在一定条件下,海雾能够深入内陆几十甚至几百公里远,造成沿海地区出现低能见度的天气,其对港口活动、沿海公路交通和近海作业的影响经常在新闻中出现。因此,对沿海地区雾的研究受到了许多国内外学者的重视; Lewis 等[1]利用探空资料对加利福尼亚沿岸海雾的形成和消散机制进行了分析, Cho 等[2]利用大气下垫面的水文资料对朝鲜半岛周边海域海雾的形成机制也进行了解释,梅婵娟等[3]利用威海市 6 个基本气象站的观测资料探讨了影响沿海雾生成的相关因子,田小毅等[4]利用长江沿海地区布设的自动站对大雾发生时的气象要素特征进行分析并提炼了预报指标。上述研究为沿海雾的监测分析提供了很好的实践,但是以上研究大多采用大气下垫面的气象水文资料,无法探测到雾的空间结构,同时常规探空数据时间分辨率较低,很难提取到大雾生消时刻大气的热力动力状况;另外,卫星探测在确定全球雾的时空特性方面有很大的潜力,但是由于雾顶温度接近当地的海面表面,因此卫星探测算法并不总是能够完全区分雾和周围海域。这些缺陷都为沿海海雾的监测和预报研究提出了极大的挑战。

地基微波辐射计的出现及应用为沿海雾高时空分辨率的探测成为可能。地基微波辐射计可以连续监测地面至 10 km 高度的大气,填补了常规探空仪测量的时间空白。微波辐射计被动接收大气 K 波段和 V 波段的微波辐射,据此通过线性/非线性回归算法和人工神经网络来估算出诸如温度,水蒸气混合比和相对湿度等大气热力学变量,检索到的温度和湿度曲线可以帮助监测雾的发展。Haeffelin 等[5]报道了微波辐射计与其它仪器一起用于一次野外大气探测活动,该活动涵盖了 2006 年至 2007 年冬天在法国巴黎发生的 100 多次雾事件,进一步展示了地基微波辐射计在雾监测的效果。本文尝试利用布设在大连旅顺黄海近岸的微波辐射计监测沿海大雾的生消过程,分析过程中大气边界层温度、湿度和水汽的分布和变化特征,以期旅顺沿海雾的预报预警提供参考。

2. 探测设备及资料处理

本文所用微波辐射计是 Radiometrics 公司生产的 MP-3000A 型地基微波辐射计(以下简称 MWR)。该 MWR 将两个射频子系统(RF)整合到一起,它们共享同一天线和天线定位系统。温度廓线子系统在 51 和 59 GHz 之间、水汽廓线子系统接收频率在 22 到 30 GHz 之间用所选择的频率进行天空亮温观测,共包含 35 个通道。MWR 可提供高分辨率的温度、相对湿度和水汽廓线以及较低分辨率的液态水廓线。各个气象要素的空间分辨率为: 0~500 米高度层,每隔 50 米一层数据; 500~2000 米高度层,每隔 100 米一层数据; 2000~10,000 米高度层,每隔 250 米一层数据。其观测连续,观测时间分辨率为 2 min。该型号

的微波辐射计包含表面气象传感器(Met Sensors),用以测量周围地面空气温度,相对湿度和气压;安装于仪器顶端的红外测温仪 IRT 可估算云底温度。

由于雾是出现在大气边界层中的天气现象,本文选取微波辐射计 2000 米以下的数据进行分析,同时将高空和地面数据做 15 分钟平均处理。

与温度相比,位温具有保守性,是一种稳定的示踪物。本文引入位温变量来研究大雾期间其分布特点。位温的计算公式为:

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{0.286} \quad (1)$$

其中, T 是大气温度(unit: K), P 是大气压强(unit: hPa), P_0 是参考压强,通常选取 $P_0 = 1000$ hPa。

作一级近似,位温公式(1)可写成:

$$\theta \cong T + \left(\frac{g}{C_p} \right) Z \quad (2)$$

其中, Z 用地面以上高度代替,单位: m, $\frac{g}{C_p} = 0.0095$ K/m 为干绝热递减率($-9.8^\circ\text{C}/\text{Km}$)的负值。

在微波辐射计探测的同时,人工观测能见度,并记录能见度小于 1 km 的开始和结束时刻(北京时间),研究时段为: 2018 年 6 月 30 日 00 时至 2018 年 7 月 6 日 12 时。这期间共出现 5 次持续 1 小时以上能见度小于 1 km 的大雾事件。具体见表 1。

Table 1. Fog generation-elimination time, duration and average visibility

表 1. 大雾生消时刻、持续时间及期间平均能见度

序号	开始时间(UTC)	结束时间(UTC)	持续时间	平均能见度(km)
1	2018/06/30 14:40	2018/07/01 12:43	22 小时 3 分钟	0.1
2	2018/07/02 00:36	2018/07/02 05:40	5 小时 4 分钟	0.6
3	2018/07/02 22:23	2018/07/03 05:18	5 小时 55 分钟	0.5
4	2018/07/04 02:11	2018/07/04 06:26	4 小时 13 分钟	0.6
5	2018/07/05 13:34	2018/07/06 06:18	15 小时 44 分钟	0.3

3. 大雾过程监测

2018 年 6 月 30 日至 7 月 6 日,旅顺黄海近岸基本每天都出现大雾,单次大雾事件最长持续时间达到 22 小时,且大雾持续时间越长,期间平均能见度越低(表 1)。从生消时间看,大雾通常开始于下午和夜间,早晨以后结束。夏季旅顺地区通常在西太平洋副高外围控制之下,底层大气湿度较大,下午至夜间由于地面辐射降温,与地面接触的底层大气温度露点差降低,容易出现大雾,日出之后,随着地面升温,大雾逐渐消散。

考察大雾期间测站大气边界层演变。在本研究中,将简单的梯度方法应用于边界层高度的估算[6],边界层高度定义为底层大气位温梯度($d\theta/dz$)最大值处的高度。在 2000 高度以下微波辐射计的垂直分辨率有 50 m 和 100 m 两种,本文选取 100 m 间隔计算位温垂直梯度,估算边界层高度,分析其日变化。图 1 给出了 2018 年 6 月 30 日至 7 月 6 日 2000 米以下大气的位温垂直梯度。从时间演变来看,位温梯度最大值呈现规律性的昼夜变化,夜间,位温梯度大值区通常在 100~200 m,且位温梯度大于 $2.0^\circ\text{C}/100$ m,这一层面存在强烈的温度反转,是一稳定层,这期间夜间稳定边界层的高度通常在 200 m 以下。相反,

日出之后,这一稳定层逐渐被破坏;中午前后,由于地表的加热作用,近地面大气通常存在一位温随高度递减的超绝热层,在其上位温梯度值介于 $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,向上扩展可达 $400\sim 500\text{ m}$,对应白天对流边界层的高度。对照大雾持续时段和边界层演变可见,旅顺黄海近岸大雾的生消与边界层高度的昼夜变化存在很好的一致性。

虽然研究期间的大雾大多出现在夜间稳定边界层内,但是在6月30日和7月5日的夜间至凌晨并未出现大雾。进一步考察图1中夜间至凌晨时段位温随高度的变化,发现:其它5个夜晚,边界层底层(50 m 以下)都存在位温随高度减小的不稳定层,而6月30日和7月5日夜间至凌晨边界层内不存在类似的不稳定层。边界层底层的不稳定有利于湍流混合,进而促进雾的形成和发展,这与Payra等[7]的研究一致,而6月30日和7月5日夜间至凌晨边界层整层稳定的状态,限制湍流混合,不利于雾的形成。

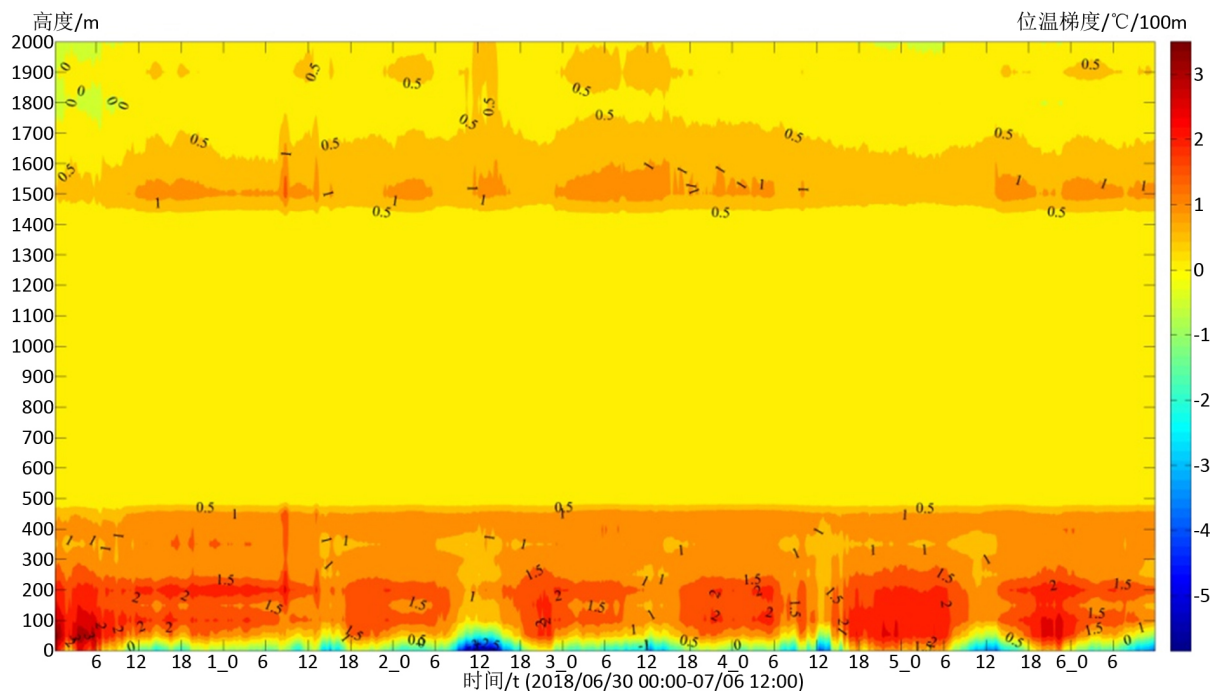


Figure 1. Potential temperature gradient profile from 2018/06/30 to 2018/07/06

图 1. 2018 年 6 月 30 日至 7 月 6 日位温梯度($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)剖面图

图 2 显示了 2018 年 6 月 30 日至 7 月 6 日 2000 m 高度以下各层大气的水汽密度(单位: g/m^3), 期间出现的 5 次大雾过程开始和结束时间用白色点划线突出显示。研究时段底层大气水汽密度维持在较高水平, 200 m 高度以下通常大于 $15\text{ g}/\text{m}^3$, 最大超过 $18\text{ g}/\text{m}^3$ 。通常高湿的条件有利于大雾的形成。但是, 分析图 2 中高空各层水汽密度分布发现: 大气中水汽密度似乎与雾的发生似乎不成明显正比例关系, 大雾生成时刻和大雾维持发展期间, 并不是水汽密度达到最大的时刻, 大雾期间水汽密度也非一成不变地维持在相对较高的水平; 相反, 在大雾生成时刻, 同一高度层的水汽密度表现出减小的趋势, 同时在大雾消散时, 同一高度层水汽密度又出现升高态势。这可能与大雾发生时大气中水分的相变有关。图 3 给出了对应时刻大气液态水含量空间分布。大雾发生和发展期间, 大气中液态水含量显著增大, 且这种变化在各个层面近乎同时发生, 只是各层较前一时次液态水增加的量值有所不同, 当大雾消散时, 各层液态水含量又“同时”减少。什么原因造成底层大气水汽和液态水含量的这种转化, 促成大雾生成和消散的是需要进一步探究的问题。

考察大气边界层气温演变(图 4)。大雾开始前, 500 m 高度以下大气逆温已经形成, 大雾的生成与 500 m

以下大气降温对应关系明显，这5次大雾开始时刻，底层大气均出现了降温。降温减小了温度露点差，底层大气逐渐饱和，促使水汽向液体水转化，进而形成了大雾。其后，底层气温相对稳定，变化幅度在 2.0°C 以内，500 m高度以下逆温维持，大雾处于发展和维持之中。当底层气温开始升温后，大雾开始消散。

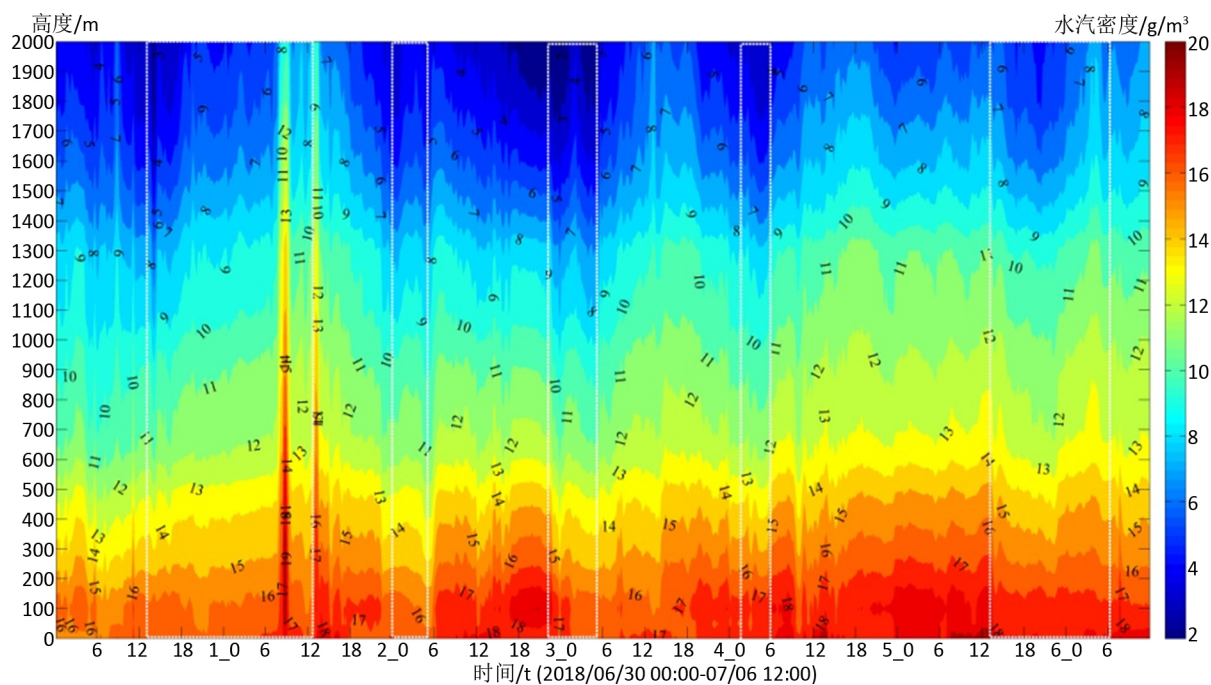


Figure 2. Water vapor density profile from 2018/06/30 to 2018/07/06

图 2. 2018 年 6 月 30 日至 7 月 6 日水汽密度(g/m^3)剖面图

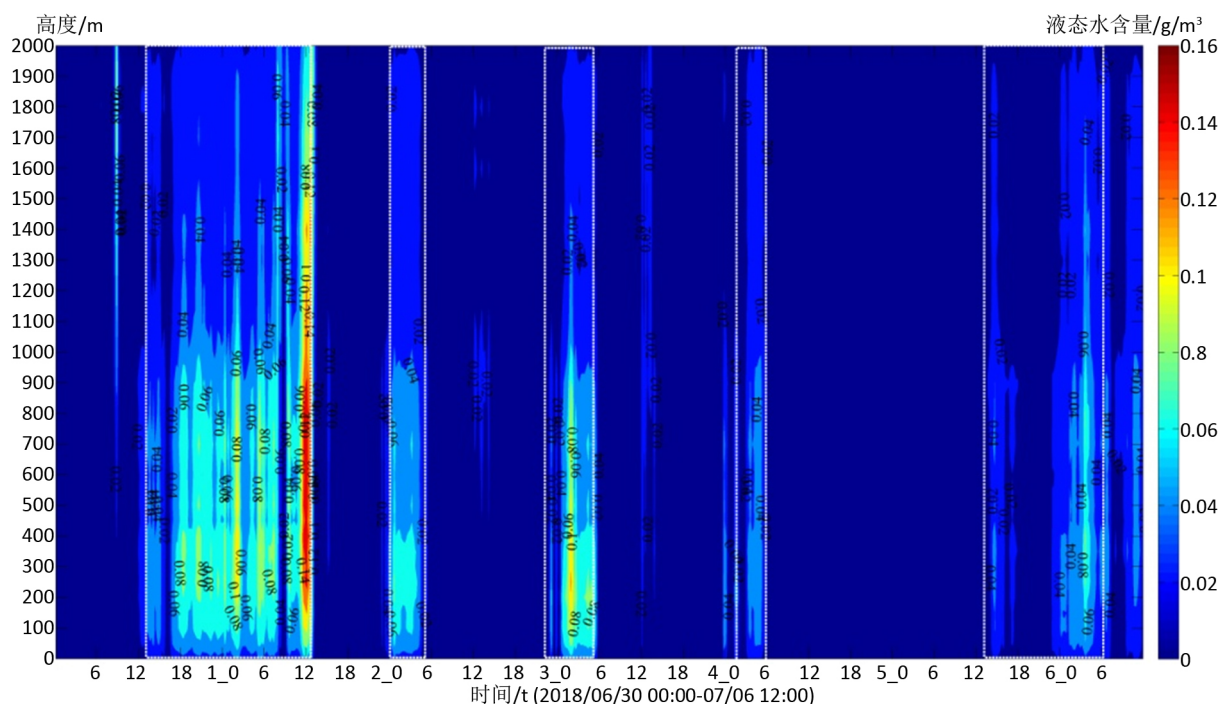


Figure 3. Liquid water content profile from 2018/06/30 to 2018/07/06

图 3. 2018 年 6 月 30 日至 7 月 6 日液态水含量(g/m^3)剖面图

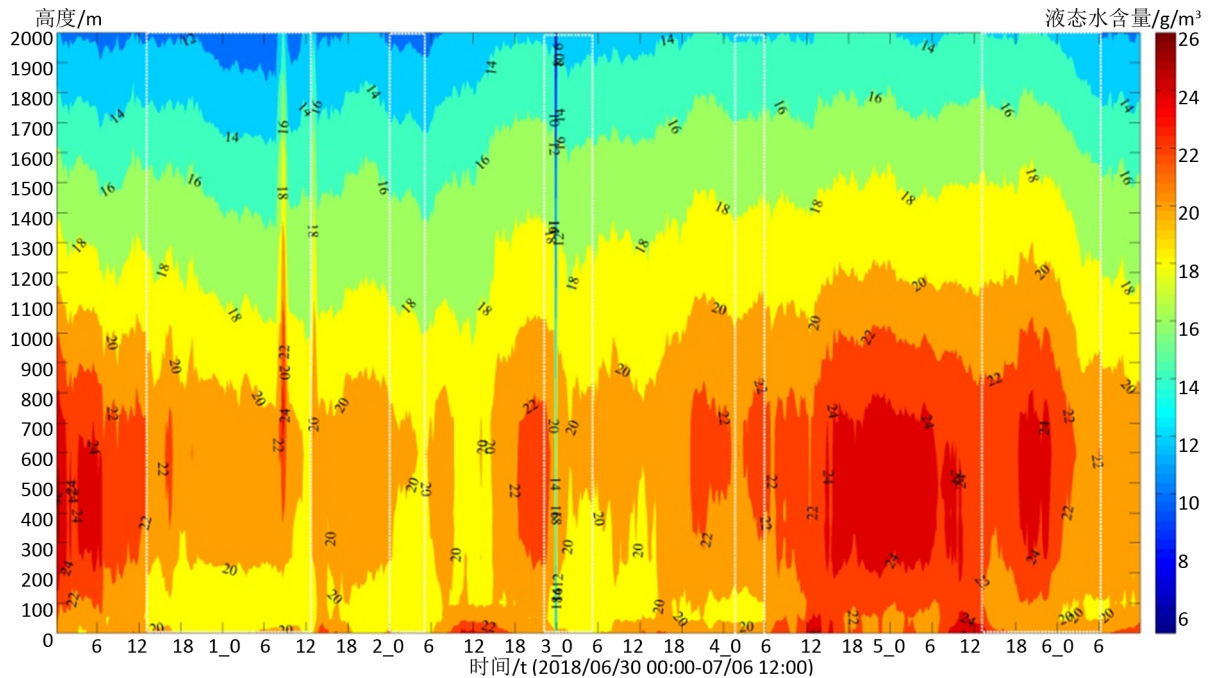


Figure 4. Temperature profile from 2018/06/30 to 2018/07/06

图 4. 2018 年 6 月 30 日至 7 月 6 日气温($^{\circ}\text{C}$)剖面图

4. 小结

MP-3000A 型地基微波辐射计高时空分辨率的数据清晰展示了 2018 年 6 月底至 7 月初发生在旅顺黄海近岸 5 次大雾过程中大气边界层热力场的变化, 揭示了大雾过程发生的热力背景和触发因素, 为大雾监测研究提供了区别于常规探测的新手段。

未来, 可进一步挖掘微波辐射计数据的应用效果, 使用其进行沿海大雾的短时临近预报预警。

参考文献

- [1] Lewis, J. M., Koracin, D. and Redmond, K.T. (2004) Sea Fog Research in the United Kingdom and United States: A Historical Essay Including Out-Look. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**, 395-408. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-395>
- [2] Cho, Y., Kim, M. and Kim, B. (2000) Sea Fog round the Korean Peninsula. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **39**, 2473-2479. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039%3C2473:SFATKP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039%3C2473:SFATKP%3E2.0.CO;2)
- [3] 梅婵娟, 张灿. 威海沿海地区雾的气候特征及相关影响因子分析[J]. *山东气象*, 2017(3): 22-26.
- [4] 田小毅, 张志薇. 长江沿海地区雾的特征及影响因子分析[J]. *灾害学*, 2019, 34(1): 51-55.
- [5] Haeffelin, M., Bergot, T., Elias, T., Tardif, R., Carrer, D., Chazette, P., Colomb, M., Drobinski, P., Dupont, E., Dupont, J.C., Gomes, L., Musson-Genon, L., Pietras, C., Plana-Fattori, A., Protat, A., Rangognio, J., Raut, J.C., Rémy, S., Richard, D., Sciare, J. and Zhang, X. (2010) Parisfog: Shedding New Light on Fog Physical Processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **91**, 767-783. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2671.1>
- [6] Garratt, J.R. (1992) *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [7] Payra, S. and Mohan, M. (2014) Multirule Based Diagnostic Approach for the Fog Predictions Using WRF Modelling Tool. *Advances in Meteorology*, **2014**, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2014/456065>