贵阳机场冬季一次大雾的三维数值模拟研究

刘开宇

（民航贵阳空管中心，贵阳，550012）

摘　　要

本文利用中尺度数值模式 MM5 对贵阳机场的一次辐射雾天气过程进行数值模拟研究，并在成功模拟的基础上，进行敏感性试验。结果表明：MM5 中尺度非静力模式对此次大雾的生消演变过程具有较好的数值模拟能力；辐射是雾发生的关键因素；模式中大气辐射传输过程及微物理过程的选取对雾的强度及雾区分布有明显影响；高分辨率模式可以充分考虑复杂地形对雾的影响以及雾演变过程中气象条件的变化。

关键词：数值模拟　液态水含量　能见度　敏感性试验　高分辨率

1 引言

雾是灾害性天气之一，对交通运输有十分重要的影响。雾的预报难度很大，20 世纪 60 年代初，Fisher[1] 等首次建立了雾数值模式，随后 Zdunkowski[2][3] 、Brown[4] 等对雾模式进一步完善，但国内外对雾的模拟研究大都采用一维、二维和三维模式，由于它们是专门针对雾设计的，无法考虑大尺度环境场变化对雾的生消的影响，具有一定的局限性。随着中尺度数值模式发展的日趋成熟和完善，人们逐步开始利用中尺度数值模式进行雾模拟研究，美国国家大气研究中心（NCAR）和宾夕法尼亚州立大学联合研制的中尺度气象模式系统（MM5）中建立了云水（冰）和雨水（雪）的预报方程，考虑了云雾的微物理过程。一些数值模拟试验研究证明，MM5 能较好地模拟出雾的发展演变，傅刚[5]、樊琦[6] 、石红艳[7]等利用 MM5 模式对辐射雾的生成原因进行了数值模拟研究，结果都表明了 MM5 中尺度模式对雾有很好的模拟能力。

雾是影响贵阳机场飞行的危险天气之一，因大雾造成飞机延误、返改航的现象时有发生，常造成较大的经济损失。因此，对贵阳机场雾进行研究具有一定的意义。本文对贵阳机场冬季的一次辐射大雾过程进行数值模拟，并在成功模拟的基础上，进行了一些敏感性试验，分别探讨辐射传输过程、微物理过程以及模式分辨率对此次辐射雾生消的影响。

2 方案及资料

本文利用中尺度数值模式 MM5 对此次大雾进行模拟研究中，采用了三重双向嵌套方案，水平范围以(26.35 °N，106.42 °E)为中心，第一个区域(D01)格距为 81 公里，格点数为 99×99；第二个区域(D02)格距为 27 公里，格点数为 91×91；第三个区域(D03)格距为 9 公里，格点数为 97×97；数值时间积分步长为 180 分钟，并选用了 Reisner 多相显式水汽方案，

Grell 积云参数化方案，Blackadar 行星边界层参数化方案,5 层土壤模式和云辐射方案等。

模式的初始条件和每 6 小时侧边界资料为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 FNL(Final Analysis)客观分析资料，水平分辨率为 1º×1º，26 层等压面，时间间隔为 6 h。客观分析所用资料取自全球电信系统资料，其中包括常规观测资料，飞机及航海探测资料和卫星云迹风资料等。

3 天气实况

2002 年 1 月 5 日凌晨 2 时至 11 时 45 分，贵阳机场出现了一次大雾天气过程，能见度

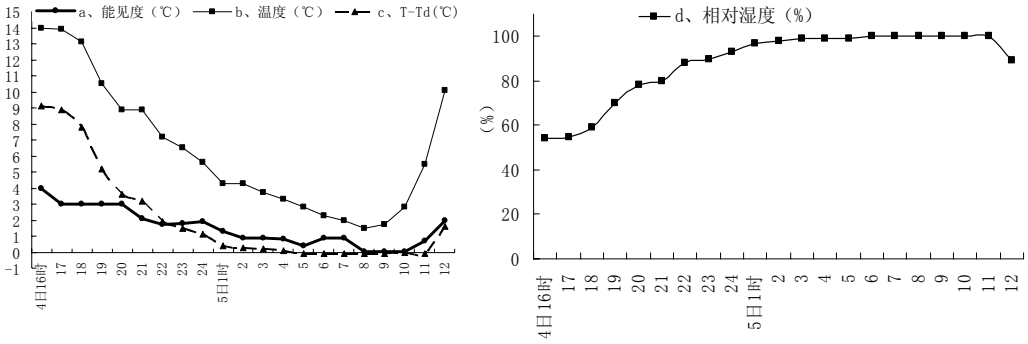


图 1　2002 年 1 月 4 日 16 时-5 日 12 时贵阳机场各气象要素的演变

最低时只有 0.05 km。从气象要素的变化可知（图 1），随着能见度的降低，相对湿度逐渐升高至 100%，温度及温度露点差逐渐降低达饱和状态，当大雾消散后，温度和温度露点差陡升，而相对湿度减小。

4 模拟的结果和实况的对比

图 2 为贵阳机场模拟的能见度与实况时序图的对比。实况 02 时能见度为 0.8km，之后能见度逐渐降低，至 05 时达 0.4km，06 时能见度升至 0.9km，08 时至 10 时又下降至 0.05km 并维持，10 时后逐渐升高，12 时能见度达 1km 以上。这是因为 06 时之前由于地面辐射降

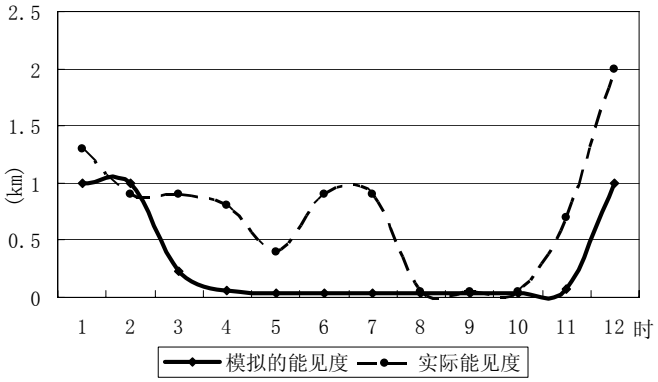


图 2　2002 年 1 月 5 日 02 时至 12 时贵阳机场模拟的能见度与实际能见度时序图

温使近地面水汽充分凝结成雾，能见度降低，06 时至 07 时降温不明显，使此时段能见度

稍微升高，而日出时温度大幅下降，饱和湿空气继续凝结成雾，能见度迅速下降；08 时后，近地面有弱冷空气入侵，近地面温度进一步下降，逆温增强，使大量水汽积聚在低层发生凝结，雾浓度增强，之后由于逆温层的维持，阻挡了太阳辐射，增温缓慢，浓雾维持，10 时后，温度逐渐升高，能见度随之逐渐升高。从模拟的能见度可知，5 日 02 时能见度为 1km 左右,03 时能见度降为 0.23km，04 时能见度降为 0.058km，之后能见度维持在 0.1km 以下，至 12 时大雾消散。与实况比较可知，雾的出现及消散与实况基本一致，大雾出现时间比实况略晚一些，雾的消散时间与实况十分吻合，但模拟的能见度值偏低，这是因为实况为贵阳机场的能见度值，模拟的能见度为平均值，而此次大雾过程为一次大范围的天气过程，因此造成模拟的贵阳机场能见度值比实际偏低。

由以上分析可知，控制试验对这次辐射雾天气过程较成功地进行了模拟，这为之后的敏感性试验奠定了基础。

5 敏感性试验的结果分析

为了解辐射传输过程、微物理过程对辐射雾生消的影响，本文进行了 3 组敏感性对比模拟试验研究。在大气辐射传输过程的 2 组敏感性模拟试验中，分别采用了去掉辐射项的方案以及 RRTM 大气长波辐射方案，而其他方案均与控制试验中的一致；在微物理过程敏感性模拟试验中，除将 Reisner 微物理显式方案以混合相微物理显式方案取代外，其他物理方案与控制方案一致。

另外，针对贵阳机场辐射雾难于预报、受地形影响较大的特点，为了探讨复杂地形下雾的形成机理、雾发展演变过程中气象条件的变化以及雾的发生和移动，在不改变物理方案和参数选择的基础上，本文将模式分辨率提高到 1km 进行了高分辨率的敏感性试验研究。设计了五重嵌套方案，前三个区域与控制试验相同，第四个区域(D04)格距为 3 公里，第四个区域在第三个区域中的起始点坐标为(15,12)，格点数为 181×181，第五个区域（D05）格距为 1 公里，第五个区域在第四个区域中的起始点坐标为(50,52)，格点数为 211×211。D04 的初始场和侧边界使用 D03 的模拟结果经过 NESTDOWN 程序插值生成，D05 以 D04 的模拟结果经 NESTDOWN 程序插值生成其初始场和侧边界条件，D04 在 D03 积分 3 小时(相当于 1 月 4 日 23 时）开始积分，时间积分步长为 9 分钟，D05 在 D04 积分 1 小时(相当于 1 月 4 日 24 时)开始积分，时间积分步长为 3 分钟，同时为了更细致且连续地研究此次辐射雾发生的演变过程，第五个区域（D05）每 10 分钟输出一次结果。

雾和云的区别仅仅在于是否接触地面[8],也可以说当云接地时即为雾，而雾抬升后形成低云，因此也可以用云中的液态水含量来描述雾。按照一般的定义[9],雾的液态水含量的范

围为 0.05-0.2 g/kg，但根据各地的地域特点和雾形成条件不同,雾中的液态水含量范围也各有不同,本文取液态水含量 0.05 g/kg 为雾区临界值。

5.1 大气辐射过程的影响

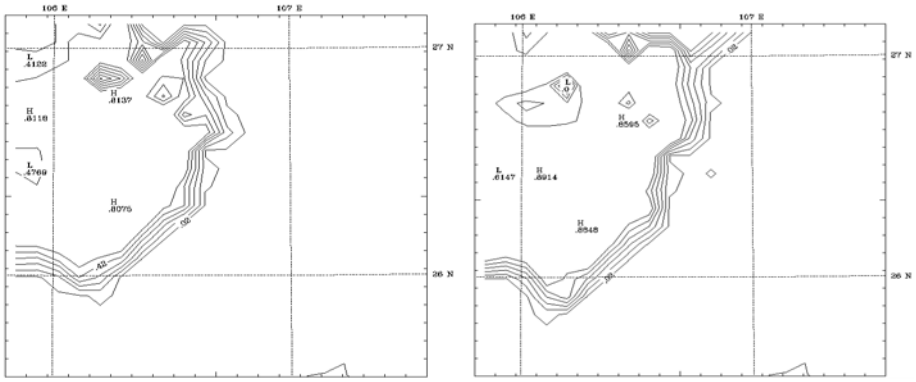
为了探讨辐射对雾形成和消散的影响，本文进行了两个敏感性试验，在第 1 个敏感性试验中去掉了辐射项的计算（试验 A），在第 2 个敏感性试验中选用了 RRTM 长波辐射方案（试验 B）。

5.1.1 不考虑辐射的模拟结果分析（试验 A）

为了研究此次雾的性质，在试验 A 中不考虑辐射的影响，即去掉了辐射项（包括太阳短波辐射、地面和大气的长波辐射）。从模拟的液态水含量沿 26° 32 N 的垂直剖面图(图略)可知，去掉辐射项后，虽然能模拟出逆温层，但始终没有出现雾。这是因为由于没有地面长波辐射冷却，近地层接近饱和的空气不能发展成雾，同时也没有雾的消散。因此辐射是雾发生的关键因素，也进一步说明了此次大雾过程以辐射雾为主。

5.1.2 RRTM 长波辐射方案模拟结果分析（试验 B）

由于地面和大气的长波辐射冷却是辐射雾形成和发展的重要因素,本文在试验 B 中选用了 RRTM 长波辐射方案进行模拟,并与控制试验的云辐射方案结果对比分析,以探讨两种辐射方案对雾生消过程的影响。图 3 为两种辐射方案模拟的 08 时雾中液态水含量分布图的对比。从图中可以看出，试验 B 模拟的液态水含量最大值约为 0.89 g/kg，比控制试验的液态水含量最大值增大了 0.05 g/kg，且雾区范围也明显增大。这可能是因为 RRTM 长波辐射方案重



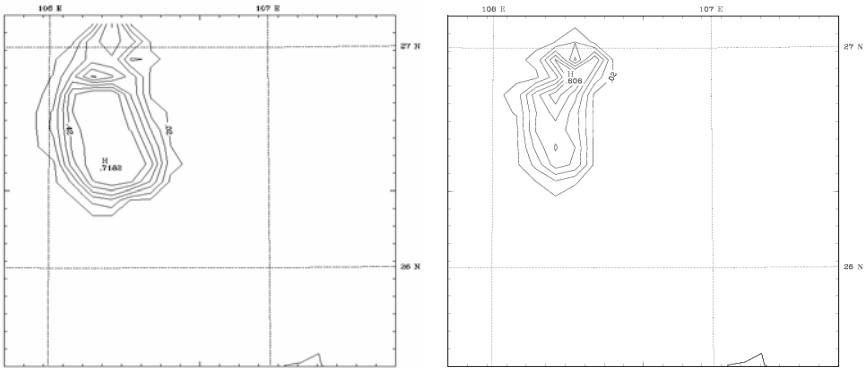
(a) 云辐射方案　　(b) RRTM 辐射方案

图 3 MM5 模拟的不同辐射方案雾中液态水含量(2002 年 1 月 5 日 08 时)对比图

点考虑了水汽、臭氧和二氧化碳对长波辐射的吸收,使近地层的辐射冷却率比控制实验大,降温值增加,同时空气过饱和度增大,因此液态水含量值及范围比控制试验大。

5.2 微物理过程的影响分析

为了研究微物理过程方案对这次辐射雾的影响,在敏感性试验 C 中采用了没有考虑霰和凇附过程的混合相(Mixphase)显示方案。图 4 是控制试验和敏感性试验 C 模拟的此次大雾过



(a) Reisner2 方案　　(b) Mix phase 方案

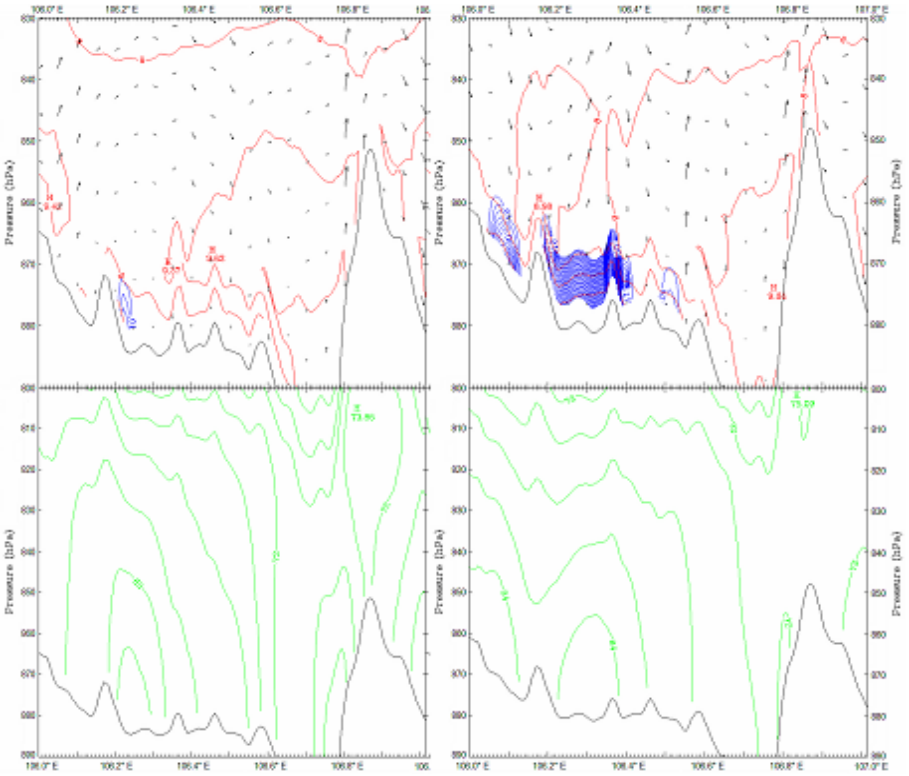
图 4　MM5 模拟不同水汽方案的雾中液态水含量(2002 年 1 月 5 日 02 时)对比图

程 t=6 h(即相当于 2002 年 1 月 5 日 02 时)时雾中液态水含量的水平分布图。从图中可看出,试验 C 模拟的雾中液态水含量的最大值(0.61 g/kg)比控制试验模拟的雾中液态水含量的最大值(0.72 g/kg)减小了 0.11 g/kg 左右,且雾区的水平范围明显减小。这是因为此次辐射雾天气过程发生在冬季，Reisner2 方案中增加了霰和冰晶数浓度的预报,使模式在雾形成、发展和消散过程中考虑了更多更复杂的微物理过程,如凇附、霰的碰并、冻结和融化、凝结和蒸发、凝华和升华等, 而 Mixphase 方案中没有考虑凇附过程和霰的预报，因此试验 C 的液态水含水量值及雾区范围比控制试验小。

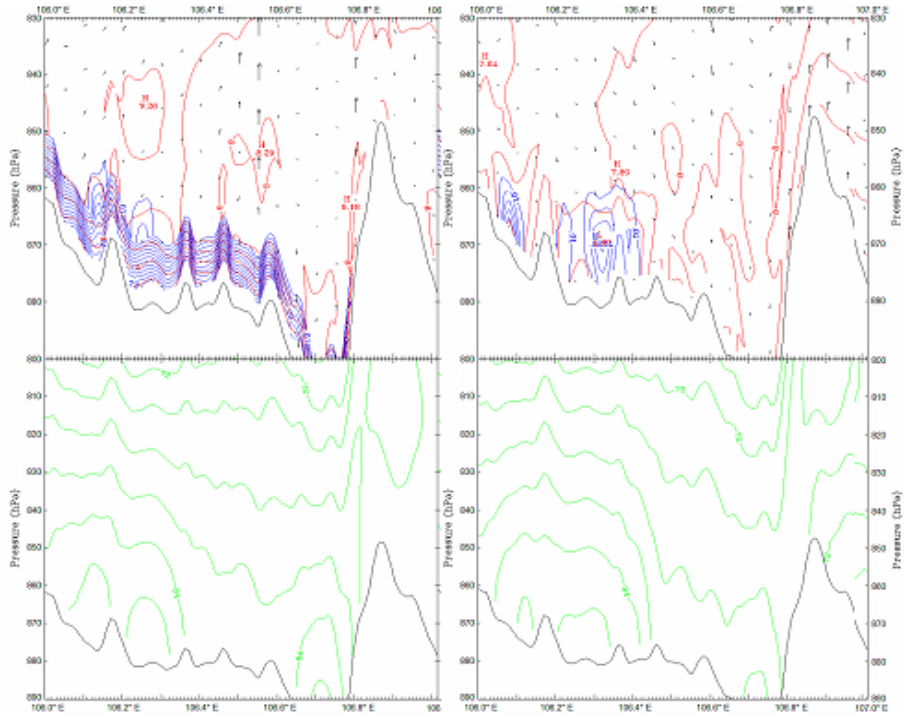
5.3　高分辨模拟结果分析

对于地形复杂的高原地区，高分辨率可以提高地形的精度，充分考虑地形的影响，从而改进模拟效果。

图 5 是 1 km 分辨率模拟的此次大雾过程 t=20 m、160 m、540 m、710 m 的相对湿度及雾中液态水含量沿 26° 32 N 的垂直剖面图。由图可看出，模式分辨率达 1km 后，地形精度得到明显提高，能非常清晰地反映贵阳机场（26.32° N、 106.48° E）周围的地貌。雾首先在水汽条件较好的红枫湖西岸背风坡山坡上生成，液态水含量达 0.05 g/kg,雾的高度不高，湖区西岸、东岸上空及以东地区包括贵阳机场出现逆温，湿度较大，相对湿度达 80 %，湖区至 106.7° E 附近的垂直运动较弱，近地面风很小；随后，东岸生成雾，东西岸雾区连成一片，对流层中、低层风速逐渐减小，近地面风转为静风，逆温逐渐增强，逆温区及湿区扩大，雾区范围逐渐扩大，浓度增强、高度增高，且雾区与逆温区及湿区范围几乎吻合；积分至 160 m 时，相对湿度为 80 %的湿区扩散至贵阳机场，贵阳机场出现大雾，湖区及 106.1° E 附近的逆温增强，湿度增大，相对湿度达 84 %，雾的浓度进一步增强；积分至 540 m



(a) t=20 m　　(b) t=160 m



(c) t=540 m　　(d) t=710 m

图 5 MM5 模拟的 2002 年 1 月 5 日大雾的沿 26° 32 N 垂直分布图

（蓝色实线为雾中液态水含量，间隔：0.02g/kg；红色实线为温度线，间隔：1℃；绿色实线为相对湿度，间隔为：2%）

时，雾区连成一片，形成大范围雾，液态水含量等值线十分密集，最大含水量达 0.75 g/kg，此时雾达到最浓，但高度保持不变，此时边界层出现温度等值线密集区，雾区与逆温区、湿

区分布一致，相对湿度最大达 86 %以上；之后，随着辐射增温，近地面温度升高，破坏了逆温层的存在，使逆温层逐渐抬升或消失，地势较低处及山脊的雾先消散；积分至 710 m 时，逆温减弱，相对湿度为 80 %湿区范围减小，贵阳机场及以东地区的已雾消散，湖区及 106.1° E 的雾仍维持。积分至 740 m 时，雾全部消散。

由 1 km 分辨率模拟的大雾生成前后的三维立体图（图 6）可看出,此次辐射大雾在水汽条件较好的地势低洼地带局地生成后向四周扩散，一部分沿山坡爬升，一部分沿山谷下滑，最终形成大范围雾区。日出后虽有辐射增温，但因逆温层的存在而阻挡了雾的消散。

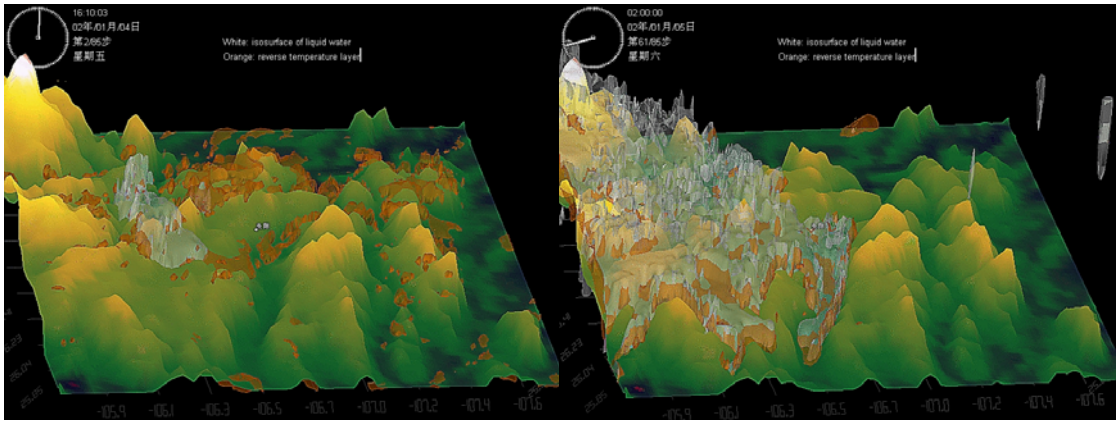


图 6　MM5 模拟的 2002 年 1 月 5 日贵阳机场辐射大雾生成前后的三维立体分布图

（白色为雾区，棕色为逆温层）（左图为 0 时 10 分，右图为 10 时）

由以上分析可知，此次大雾过程是一次分布较广的大范围雾。辐射雾常出现在地势相对较低且水汽条件好的凹地、盆地和低洼地带，且首先出现在山脉背风坡一侧的山坡上。在雾的形成与发展过程中，先出现逆温，随后出现湿区，最后形成雾。在低层出现等温层的条件下，水汽条件较好（即湿度较大）的水面也可形成雾；且雾区与逆温区、湿区的范围基本一致。

因此，高分辨率的模拟结果能够得到精确的地形分布，较好地反映了复杂地形下雾的形成机理以及雾发展演变过程中气象条件的变化。

6 结论

本文利用 MM5 中尺度非静力模式对贵阳机场冬季一次辐射大雾进行了数值模拟研究。得到以下结论：

(1)、MM5 中尺度非静力模式对此次大雾的生消演变过程具有较好的数值模拟能力,尤其是雾形成和消散的时间与实况比较吻合。

(2)、辐射是雾发生的关键因素，此次大雾过程以辐射雾为主，且大气辐射传输过程除可影响到液态水含量值外,还对辐射雾区的水平分布有明显影响。

(3)、模式中微物理过程的选取对雾的强度及雾区分布亦有明显影响。

(4)、对于地形复杂的山区，1km 分辨率的模拟结果能够得到精确的地形分布，充分考虑地形的影响，同时加密输出结果后，可以细致且连续地研究复杂地形对辐射雾的影响，以及雾发展演变过程中气象条件的变化，为准确预报雾的发生地点、发生及消散时间提供一定的科学依据。

参考文献

[1] Fisher E L，et al.，An experiment in numerical prediction of fog and atratus，J Atmos，Sci，1963，20，425-437

[2] Zdunkowski W，et al.，A preliminary prediction analysis of radiation fog.，Pure Apple Geophys，1969，75，278-299

[3] Zdunkowski W，et al.，A radiative convective model for the prediction of radiation fog，Bound-Layer Meteor.1973,，152-177

[4] Brown R，Roach W T.The physics of radiation fog: Ⅱ-a numerical study，Quart J Poy Meteor Soc，1976，102，333-354

[5] 傅刚、张涛、周发，一次黄海海雾的三维数值模拟研究，青岛海洋大学学报，2002，32(6):859-867

[6] 樊琦、王安宇、范绍佳，珠江三角洲地区一次辐射雾的数值模拟研究，气象科学，2004，24(1):1-7

[7] 石红艳、王洪芳、齐琳琳等，长江中下游地区一次辐射雾的数值模拟，解放军理工大学学报，2005，6(4):404-408

[8] 马振华、王绍武、王明星等，大气科学辞典，气象出版社，1994：427

[9] Cotton W R，ANTHES R A， 风暴和云动力学［M］,北京：气象出版社，1993:331-342