

雾顶辐射冷却驱动的湍流混合对华北平原雾的影响作用

田梦^{1,2} 吴彬贵^{1,2*} 廖云琛^{1,2,3} 杨健博^{1,2} 郭阳⁴ 刘海玲^{1,2} 鞠婷婷⁵

1 天津市海洋气象重点实验室, 天津 300074

2 天津市气象科学研究所, 天津 300074

3 天津市津南区气象局, 天津 300350

4. 天津市气象信息中心, 天津 300074

5. 大连海事大学, 大连 辽宁 116026

摘要: 雾顶辐射冷却是雾演变过程中的一个重要物理过程, 它能驱动“自上而下”的湍流混合, 因此 YSU (Yonsei University) 方案中引入了刻画该过程的模块 (*ysu_topdown_pblmix*)。然而, 这种“自上而下”的湍流混合对华北平原雾的影响作用尚不清楚。本文基于葵花-8 卫星反演资料、地面自动站观测资料、大气边界层观测塔涡动相关观测, 结合大涡模拟结果, 分析 *ysu_topdown_pblmix* 在华北平原雾模拟中的影响作用。研究发现, 虽然 *ysu_topdown_pblmix* 整体降低了华北平原雾的雾区模拟评分, 但它却明显改进了近地层温度、湿度和雾边界层结构的模拟, 这得益于雾顶辐射冷却驱动的“自上而下”的湍流混合。然而, 目前 *ysu_topdown_pblmix* 中的夹卷作用偏强, 导致雾顶之上的暖空气过多卷入雾体内部使得雾过快消散。敏感性试验显示, 通过减小 *ysu_topdown_pblmix* 中的蒸发增强系数可以降低雾顶湍流夹卷强度, 从而改善雾区模拟效果。本文研究工作表明, 华北平原雾的数值模拟中有必要引入 *ysu_topdown_pblmix*, 但需要进一步改进其中的有关参数。

关键词 雾模拟 雾顶湍流 *ysu_topdown_pblmix* 大气边界层参数化 华北平原

文章编号 中图分类号 P426.4 文献标示码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2307.22249

收稿日期 2022-12-25; 网络预出版日期 2023-00-00

作者简介 田梦, 女, 1989 年出生, 工程师, 从事大雾数值预报方面的研究, E-mail: tianm08xs@163.com

通讯作者 吴彬贵, E-mail: tjwbq@pku.org.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (42205009、42205092、42105084), 天津市自然科学基金 (22JCQNJC00370), 环渤海区域科技协同创新基金 (QYXM202112、QYXM202202), 天津市气象局科研项目 (202226dngxm05; 202306ybxm02)

Funded by National Natural Science Foundation of China (42205009, 42205092, 42105084), The Natural Science Foundation of Tianjin (22JCQNJC00370), Science and Technology Collaborative Innovation Fund of Bohai Rim Region (QYXM202112, QYXM202202), and Scientific Research Projects of Tianjin Meteorological Bureau (202226dngxm05, 202306ybxm02)

The Influence of Turbulent Diffusion Driven by Fog-Top

Radiative Cooling on Heavy Fog in North China Plain

Meng TIAN^{1,2}, Bingui WU^{1,2*}, Yunchen LIAO^{1,2,3}, Jianbo YANG^{1,2},

Yang GUO⁴, Hailing LIU^{1,2}, Tingting JU⁵

1 Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074

2 Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin 300074

3 Jinnan Meteorological Bureau, Tianjin 300350

4. Tianjin Meteorological Information Center, Tianjin 300074

5 Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026

Abstract Radiative cooling at the top of fog is a crucial physical process during the evolution of fog, driving a “top-down” turbulent mixing. Therefore, the YSU (Yonsei University) scheme incorporates a module (*ysu_topdown_pblmix*) to represent this process. However, the influence of such “top-down” turbulent mixing on heavy fog events in the North China Plain remains unclear. This study evaluates the suitability of *ysu_topdown_pblmix* in simulating fog events in the North China Plain based on Himawari-8 satellite retrievals, automatic station observations, 15-layer atmospheric boundary layer gradient measurements, and 5-layer turbulence-related observations. Large-eddy simulations are also used to supplement the analysis. The investigation reveals that while *ysu_topdown_pblmix* overall decreases the fog area simulation scores in the North China Plain, it significantly improves the simulation of near-surface temperature, humidity, and fog boundary layer structure. This enhancement is attributed to the “top-down” turbulent mixing driven by radiative cooling at the fog top. However, the present *ysu_topdown_pblmix* exhibits an excessive entrainment effect, leading to too much intrusion of warm air above the fog top, resulting in rapid dissipation of fog. Sensitivity tests demonstrate that reducing the evaporative enhancement coefficient in *ysu_topdown_pblmix* can mitigate the strength of turbulent entrainment at the fog top, thereby improving the simulation of fog events. These findings suggest that incorporating *ysu_topdown_pblmix* is necessary for numerical simulations of heavy fog

49 events in the North China Plain, but further refinement of relevant parameters is required.

50 **Keywords** Fog simulation, Fog-top turbulence, *ysu_topdown_pblmix*, Boundary layer
51 parameterization, North China Plain

52 1.引言

53 华北平原是我国陆雾多发地区之一，大雾伴随的低大气水平能见度（以下简
54 称大气能见度）会严重影响该地区海陆空交通运输的安全，给国民经济发展和人
55 民生命安全造成损失。然而雾的预报准确率远不能满足服务需求，如 NCEP
56 （National Centers for Environmental Prediction）数值预报显示雾的 ETS(Equitable
57 Threat Scores) 评分只有 5%，明显小于降水量预报的 35% (Zhou et al., 2012)。
58 因此，提高大雾数值预报准确率，对保障交通运输安全和国民经济生产正常运行
59 具有十分重要的意义。

60 雾的生消发展是大气动力、热力过程和微物理过程综合作用的结果，影响因
61 素主要包括天气系统、辐射、湍流、云微物理、气溶胶和下垫面条件等 (Lewis et
62 al., 2004; Gultepe et al., 2007; Koraćin et al., 2014, 2017; 傅刚等, 2016; 牛生杰等,
63 2016)。针对华北平原雾，学者们利用各种观测手段和数值模拟等技术方法在气
64 候特征 (Quan et al., 2011; Cao et al., 2015; 陈东辉等, 2015; 孙彧等, 2016)、天
65 气背景(张人禾等, 2013; 田梦等, 2020)、大气边界层结构(郭丽君和郭学良, 2016;
66 黄翊和彭新东, 2017) 及云微物理特征 (Jia et al., 2019) 等方面开展了许多研究。
67 结果指出：地面倒槽、华北地形槽和地面弱高压是华北平原雾多见的地面气压系
68 统 (Ye et al., 2016)，不同天气背景下雾形成前均存在近地层逆温和增湿现象
69 (Tian et al., 2019; Wu et al., 2020; 吴彬贵等, 2009)；雾形成之前，合适的风切
70 变机械湍流起重要作用 (Yu et al., 2020)；而雾形成之后，雾顶存在较强的长波
71 辐射，会驱动热力湍流，导致湍流混合作用增强，雾层向上发展增厚，雾体逐渐
72 演变成不稳定层结 (Ye et al., 2015; 吴彬贵等, 2010)。正是由于风切变和雾顶
73 热力湍流对大雾形成和发展起着重要作用，Tian et al. (2019) 测试了用于计算湍
74 流的大气边界层参数化方案对环渤海大雾预报的影响，发现 4 种不同的大气边界
75 层方案对环渤海雾面积、浓度、起止时间的预报差异很大。一系列研究表明，几
76 乎所有大气边界层方案都无法准确刻画静稳天气条件下的湍流 (Hu et al., 2013;

77 Jahn et al., 2017, 2018; 卢绪兰和彭新东, 2021), 湍流模拟偏差成为制约大雾精
78 确预报的关键科学问题 (崔驰潇等, 2018)。

79 湍流输送同时存在“自上而下”(top down)和“自下而上”(bottom up)
80 这两类方式 (Wyngrad and Brost, 1984), 分别由混合层顶部和底部通量所驱动,
81 对流边界层的垂直扩散是这两类湍流混合过程的叠加。在雾/层云条件下, 即使
82 表面通量可以忽略不计的情况下, 强烈的雾/层云顶冷却也会破坏大气边界层的
83 稳定, 并导致“自上而下”对流湍流。在雾的形成阶段, “自下而上”湍流是大气
84 边界层冷却和增湿并形成大雾的主要机制 (Gao et al., 2007)。随着雾层增厚,
85 雾顶长波辐射冷却驱动的“自上而下”热力湍流则更为关键 (黄健等, 2010),
86 因而 Huang et al. (2011, 2015) 将假相当位温梯度为零的高度定义为热力湍流界
87 面: 界面之下受“自下而上”风切变机械湍流影响, 界面之上大气主要受雾顶辐
88 射导致的“自上而下”的热力湍流影响。正是由于“自上而下”湍流对雾形成发
89 展的重要性, Wilson and Fovell. (2018) 进一步发展了显式描述该物理过程的模
90 块 (*ysu_topdown_pblmix*), 该模块考虑雾/层云顶辐射和液滴蒸发冷却所驱动的
91 湍流混合, 已经引入了 YSU (Yonsei University) 大气边界层方案 (此后称为
92 YSUmod)。

93 Wilson and Fovell. (2018) 以沿海陆地山谷雾为例, 验证了
94 *ysu_topdown_pblmix* 的有效性。近年来, 不少研究者针对 YSUmod 展开了研究。
95 譬如: Yang and Gao (2020) 将该方案应用于黄海海雾的研究; Dayal et al. (2020)
96 将该方案用于表面风速的预报过程; Lee et al. (2018) 评估了该方案在中尺度天
97 气预报模式和全球中期预报模式中应用的效果; 姜昊宇 (2021) 将该方案用于陆
98 地雾的数值模拟研究, 发现雾顶夹卷是陆雾必须考虑的物理过程, 其与陆面加
99 热过程共同影响雾内温度和湍流强度。然而, *ysu_topdown_pblmix* 对华北平原雾
100 的影响研究还相对较少。因此, 本研究旨在借助 YSUmod 方案, 探究
101 *ysu_topdown_pblmix* 在华北平原雾模拟中效果, 并分析雾顶辐射冷却驱动的湍流
102 混合对陆雾的影响作用, 为进一步改进 YSUmod 方案提供研究依据。

103 2.方法与数据

104 2.1 *ysu_topdown_pblmix* 模块简介

105 晴空时，表面热通量存在“自下而上”输送，YSU 方案被证明能够很好地
106 描述大气混合层的发展 (Noh et al., 2003; Hong et al., 2006)，然而在雾/低云存在
107 时，雾/层云顶的辐射冷却会驱动“自上而下”的湍流混合 (Driedonks and
108 Duynkerke, 1989)。尽管该物理机制早年已经被提出，并通过地表热通量间接附
109 加进大气边界层方案中 (Van Meijgaard and Van Ulden, 1998; Lock et al., 2000)，
110 但是 Wilson and Fovell (2018) 发现原来的 YSU 方案仍然没有能力描述深层湍流
111 扩散，也没有能力反映雾/低云顶辐射冷却和液滴蒸发形成的“自上而下”湍
112 流和夹卷过程，因而研发了云/雾顶湍流扩散模块 (*ysu_topdown_pblmix*)。该模
113 块包含两个主要机制：一是新增雾顶和自由大气之间的额外夹卷项，二是新增雾
114 层内“自上而下”的湍流混合。只有在判断湿绝热层顶有液态水或冰水凝结的情况
115 下，该模块才会启动，并不会影响常规对流或稳定大气边界层情况下模式的性能。

116 对于增强的云/雾顶夹卷，Wilson and Fovell (2018) 在 YSU 方案的夹卷项
117 $\overline{(w'\theta'_v)_h}$ 中直接加入一项：

$$118 \quad \overline{(w'\theta'_v)_h} = -0.15 \left(\frac{\theta_v}{g}\right) \frac{w_m^3}{h} - A \left(\frac{\theta_{vh}}{g}\right) \frac{w_l^3}{h} \quad (1)$$

119 其中，(1)式中右侧第一项是 YSU 方案原有的湍流夹卷项， θ_v 是虚位温， g
120 是重力加速度， w_m 是基于地面湍流和大气混合层风速计算的速度尺度， h 是边
121 界层高度。因为雾多发生在稳定边界层中，其表面热通量几乎可以忽略，原有夹
122 卷项很可能是无效的。所以增加右侧第二项，即雾顶辐射冷却和液滴蒸发驱动的
123 增强夹卷项。其中 A 是夹卷效率， w_l 是基于雾顶冷却所引起的辐射通量散度计
124 算得到的速度尺度。

125 需要特别指出的是，夹卷效率 $A=0.2 (1+a_2E)$ ，其中 E 反映了夹卷的蒸发增
126 强， a_2 是蒸发增强系数，这个系数主要用来控制模拟夹卷的强度，是非常重要的
127 一个参量。程序默认值为 8，但不同地区的 a_2 波动范围很大 (Nicholls and Turton,

128 1986), 并且边界层高度和夹卷率是成比例的。

129 对于雾层内的“自上而下”湍流混合, 在 YSU 方案原本的动量湍流交换系
130 数 K_m 中加入一项:

$$131 \quad K_m = \kappa w_s z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^p + \kappa w_{PBL} (h - z) \left(1 - \frac{h-z}{h}\right)^p \quad (2)$$

132 其中, (2)式中右侧第一项是 YSU 方案原有的湍流扩散系数计算, κ 是卡门
133 常数 ($=0.4$), w_s 是基于地表热通量计算得到的速度尺度, z 是模式各层高度, p
134 是形状函数 ($=2$)。新增第二项用于描述“自上而下”的湍流混合, w_{PBL} 是基于
135 边界层顶的热通量计算得到的速度尺度。详细的模块介绍见 Wilson and Fovell
136 (2018)。

137 2.2 华北地区大雾的个例遴选

138 华北地区大雾多出现于秋冬季节, 存在平流雾、辐射雾、锋面雾等多种雾型,
139 年均出现雾 13.5 次 (吴彬贵等, 2009; Wu et al., 2020)。本文随机选择了三次覆盖
140 华北大部分地区的大雾过程 (表 1)。虽然雾的持续时间、影响系统以及形成原
141 因不尽相同, 但区域大雾总体上呈现出夜间形成、白天消散的特征, 说明辐射冷
142 却过程都在大雾生消演变中起到了关键作用。

143 表 1 三次华北地区大雾过程基本信息介绍

144 Table 1 Basic information about three heavy fog processes over the North China Plain

名称	模拟起始时间 (北京时)	华北平原雾生消时段	大雾形成类型
个例 1	2016 年 12 月 17 日 08 时	2016 年 12 月 17 日 20 时-18 日 15 时	锋面雾, 后期为辐射雾
		2016 年 12 月 18 日 17 时-19 日 17 时	
		2016 年 12 月 19 日 19 时-20 日 08 时	
个例 2	2019 年 01 月 11 日 08 时	2019 年 01 月 11 日 16 时-12 日 11 时	平流辐射雾
		2019 年 01 月 12 日 13 时-14 日 08 时	
个例 3	2019 年 2 月 18 日 08 时	2019 年 02 月 18 日 21 时-19 日 13 时	辐射雾
		2019 年 02 月 19 日 20 时-20 日 11 时	

2.3 观测数据来源

本文用到的观测数据有：

(1) 华北地区经纬度范围 ($35\sim 43^\circ \text{ N}$, $114\sim 124^\circ \text{ E}$) 内葵花-8 卫星的雾区反演结果, 数据来自天津市气象信息中心, 卫星反演雾算法采用双通道差值法 (Ellord, 1995; Kim et al., 2018), 将 $11.2 \mu\text{m}$ 与 $3.9 \mu\text{m}$ 通道亮温差值 $> 2 \text{ K}$ 的区域识别为雾区 (许健民等, 2008; Gao et al., 2009; Jiang et al., 2015)。

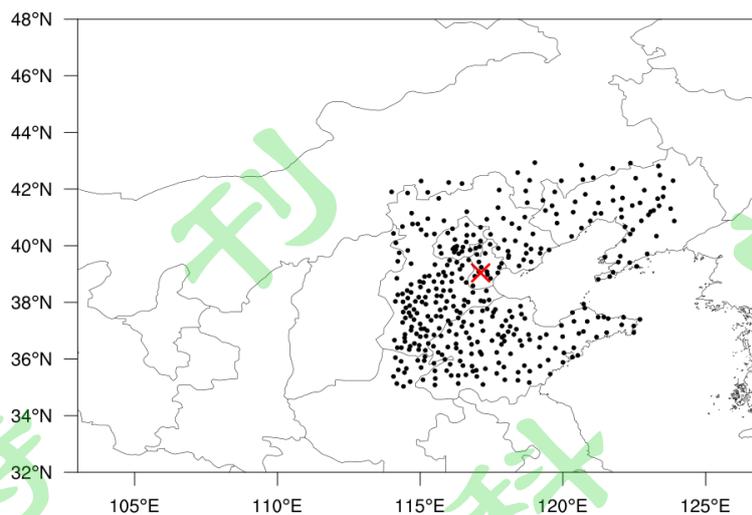
(2) 华北地区经纬度范围 ($35\sim 43^\circ \text{ N}$, $114\sim 124^\circ \text{ E}$) 内 367 个国家级自动气象站地面逐小时观测资料 (图 1), 来自中国气象局天擎共享数据库, 包括大气能见度、温度、湿度、风向风速、雨量等气象要素, 主要用于模拟检验。

(3) 天津大气边界层观测站 (39.04° N , 117.12° E) (图 1) 垂直 15 层风温湿等逐小时观测资料, 各层高度分别为 5、10、20、30、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220、250 m, 用于模拟和观测的雾顶垂直发展、雾边界层温湿廓线的对比分析。该资料来自天津市气象信息中心, 均经过了逻辑极值检查、时间一致性检查、空间一致性检查等质量控制 (金莉莉等, 2010)。

(4) 天津大气边界层观测站 CSAT3 型超声风速仪采样得到的 5 层湍流量观测, 各层高度分别为 40、80、120、160、200 m。通量数据的质量控制包括去除野点、二次坐标旋转、频率损失修正等, 同时剔除满足以下任意一个条件的数据组: (i) 风向与超声风温仪指向夹角大于 120° ; (ii) 风向与水平面夹角大于 $\pm 7^\circ$ (Foken and Wichura, 1996; Wilczak et al., 2001; 吴彬贵等, 2011); (iii) 风速小于 0.5 m s^{-1} ; (iv) 摩擦速度小于 0.05 m s^{-1} ; (v) 感热通量小于 5 W m^{-2} (田梦等, 2020)。动量湍流扩散系数 K 可以根据动量通量和风切变的大小直接确定 (Nieuwstadt, 1984; Weber, 1999):

$$K = |\tau|/(\rho S) \quad (3)$$

其中动量通量 τ 和空气密度 ρ 来自铁塔通量观测, 风切变 S 来自铁塔梯度观测。通过计算可以得到 5 层动量湍流扩散系数值 (He et al., 2021), 主要用于模拟和观测的湍流强度对比。



171

172 图 1 WRF 试验设置区域，黑色圆点代表选取的检验站点位置，红色叉号代表大气边界层观
 173 测铁塔位置

174 **Fig.1 WRF modeling domain. The black dots denote the locations of the selected national**
 175 **stations for inspection, and the red cross denotes the location of the boundary layer**
 176 **observation tower**

177 **3.数值试验**

178 3.1 数值模拟试验设置

179 3.1.1 WRF 模式设置

180 模式内核采用 WRF-ARW4.0.1 版 (Weather Research and Forecasting Model,
181 4.0.1), 以 ERA5 再分析资料 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset>),
182 水平分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 逐 3 小时) 作为初始场和侧边界条件, 由于我们主要
183 研究陆地雾, 海表面温度场 (SST) 也来自 ERA5, 且模拟过程没有更新。三个
184 雾例的模拟起始时间见表 1, 模拟时长均为 72 小时, 积分步长 30 s。模拟区域
185 见图 1, 区域中心 (40°N , 120°E), 区域网格数为 441×369 , 水平网格分辨率 5 km
186 (此分辨率与业务模式一致, 为了分析误差也采用了四重单向嵌套的大涡模拟,
187 最内层分辨率达到 40 m)。为更好体现 *ysu_topdown_pblmix* 模块的作用, 根据
188 Yang et al. (2018) 对垂直分辨率需要加密的分析, 加密了模式低层和雾顶位置,
189 设置垂直层为 53 层, 800 m 以下 21 层*。为与 YSUmod 方案开发的原文试验进
190 行对比, 基本采用了 Wilson and Fovell (2018) 推荐的物理参数化设置: 大气边
191 界层方案采用 YSU 方案, 长短波辐射参数化方案采用 New Goddard 方案 (Matsui
192 et al., 2018), 云微物理参数化方案采用 WRF Double-Moment 5-Class
193 Microphysics(WDM5) 方案 (Lim and Hong, 2010), 关闭了积云对流参数化方案
194 (张大林, 1998), 并设置水平 K 项为 2D 变形选项 ($\text{km_opt}=4$), 关闭扩散选项
195 ($\text{diff_opt}=0$) 和 6 阶短波滤波 ($\text{diff_6th_opt}=0$)。与 Wilson and Fovell (2018)
196 推荐物理参数化设置不同的是, 由于 Noah land surface scheme (Noah) 方案
197 (Tewari et al., 2004) 在试验中雾区检验评分过低 (表略), 根据姜昊宇和高山红
198 (2021) 发现 five-layer thermal diffusion scheme (SLAB) 方案对华北地区陆雾的
199 模拟效果要明显优于 Noah 方案, 陆面过程参数化方案改用 SLAB 方案 (Dudhia
200 et al., 1996), 在此基础上分别开展 Exp_YSU 和 Exp_YSUmod 试验, 以对比有无
201 *ysu_topdown_pblmix* 模块的模拟效果 (表 2)。

202 3.1.2 大涡模拟设置

203 为对比 YSU 和 YSUmod 方案存在差异的原因，同时弥补中尺度业务模式水
204 平分辨率 5 km 在研究过程中的不足，进一步补充了大涡（LES）模拟试验
205 （Exp_LES）。试验采用单向四重嵌套（图 2），其中 d01 和 d02 为中尺度模拟区
206 域，水平网格距分别为 5 km×5 km（441×369 个网格点），1 km×1 km（661×661
207 个网格点）；d03 和 d04 为 LES 尺度模拟区域，水平网格距分别为 200 m×200 m
208 （551×266 个网格点），40 m×40 m（1201×1201 个网格点）。

209 在 LES 尺度的 d03 和 d04 区域，边界层参数化方案被关闭，取而代之的是
210 采用 LES 1.5 阶 TKE（Turbulent Kinetic Energy）闭合次网格尺度湍流参数化方
211 案（Deardorff, 1980）。除了边界层参数化方案外，LES 尺度模拟与前两个试验的
212 物理参数化设置完全保持一致。四个区域的积分步长分别为 18 秒、6 秒、2 秒和
213 0.4 秒。垂直分辨率和除大气边界层方案外的物理参数化设置均与前两个试验完
214 全一致。

215 LES 模拟结果可以与气象铁塔观测事实互为印证，通过以上措施，更全面地
216 比较 YSU、YSUmod 方案与 LES 模拟及观测资料之间的差异，这种比较有助于
217 深入了解 YSU 和 YSUmod 方案在雾顶湍流混合模拟方面的异同，并为探究雾顶
218 辐射冷却驱动的湍流混合对华北平原雾的影响作用提供了更好的理解。

219 表 2 基于 WRF 的数值模拟试验对比说明

220 Table 2 Comparison of modeling experiments based on WRF

试验	设置
Exp_YSU	关闭 <i>ysu_topdown_pblmix</i> 选项
Exp_YSUmod	打开 <i>ysu_topdown_pblmix</i> 选项
Exp_LES	采用 1.5 阶 TKE 闭合次网格尺度湍流参数化方案

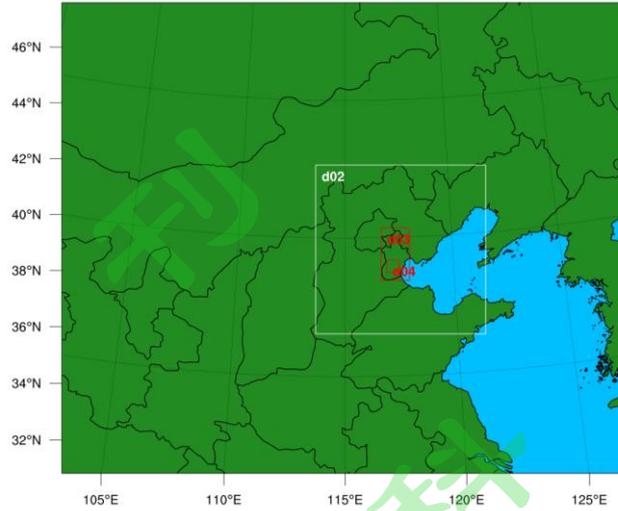


图 2 WRF-LES 模拟试验区域嵌套设置

Fig.2 Domain of WRF-LES

3.2 雾区及雾高定义

为了选取合适的液态水含量 (LWC) 阈值标准来判断模拟雾区, 结合前人研究 (何晖等, 2009; 黄翊和彭新东, 2017; 崔驰潇等, 2018; Yang and Gao, 2020; Gao et al., 2021; Liu et al., 2021), 比较了模拟雾区、卫星反演雾区和地面实况, 确定以 $LWC > 0.016$ 作为模拟雾的评判标准, 与观测事实吻合较好 (Yang and Gao, 2020)。且雾模拟研究多只是规定 LWC 的下限值, 我们发现在某些雨雾共存个例中, 如果将 $LWC < 0.7 \text{ g/kg}$ 作为上限值, 可以避免将模拟雨区误判为雾区。

实况是否有雾, 采用张翠艳等 (2020) 的定义, 当观测无降水无沙尘、相对湿度大于等于 90% 且大气能见度小于 1 km 时, 判定为雾。考虑华北平原地面中尺度站点布设很密集, 比卫星反演雾的可信度更高, 区域雾分布采信站点资料观测结果, 但为了看清雾带移动, 同时叠加了葵花-8 卫星反演结果 (图 3a-c)。

地面观测也不能提供雾厚度, 本文利用天津气象大气边界层观测站 250 m 铁塔的 15 层温湿梯度观测, 依据雾顶大致位于最大逆温以及最大湿度梯度附近的特征, 来判断雾厚度 (李子华和黄建平, 1999)。

3.3 检验指标

采用命中率 (POD), 空报率 (FAR)、漏报率 (MIS) 和 TS (threat score)

240 评分来检验不同模拟试验得到的雾区结果，计算公式分别为：

$$241 \quad \text{POD}=\text{H}/(\text{H}+\text{M}) \quad (4)$$

$$242 \quad \text{FAR}=\text{F}/(\text{H}+\text{F}) \quad (5)$$

$$243 \quad \text{MIS}=\text{M}/(\text{H}+\text{M}) \quad (6)$$

$$244 \quad \text{TS}=\text{H}/(\text{H}+\text{M}+\text{F}) \quad (7)$$

245 其中 H 代表模拟与观测同时有雾的站点数，F 代表空报站点数，即模拟有雾
246 而观测无雾的站点数，M 代表漏报站点数，即观测有雾而模拟无雾站点数。POD
247 越大说明命中率越高，FAR 越大说明空报越高，MIS 越大说明漏报率越高，TS
248 评分越大说明综合模拟效果越好。检验数据来自华北区域(35~43° N, 114~124°
249 E) 范围内的 367 个自动气象观测站 (图 1)。

250

251 4.结果与分析

252 4.1 模拟效果

253 4.1.1 雾覆盖区域的检验

254 雾天气伴随的低大气能见度对人类活动影响很大，因此对雾覆盖区域的模拟
255 能力是我们首要关注的。对三次大雾过程开展评分检验，结果表明：总体上看，
256 与 YSU 方案相比，YSUmod 方案的平均命中率(POD)下降 0.15，空报率(FAR)、
257 漏报率(MIS)分别提高 0.03 和 0.16，TS 评分下降 0.08 (表 3)。即 YSUmod 方
258 案总体降低了华北平原雾的模拟能力。不同个例中 YSUmod 方案降低雾模拟能
259 力的幅度相差较大，对个例 1 (厚雾)而言，TS 评分相比 YSU 方案显著下降了
260 0.17，而另外 2 次个例(薄雾)分别下降 0.01 和 0.06。这可能与雾顶辐射冷却驱
261 动的湍流混合过程只有在湿绝热廓线已经形成的较厚雾层内才会被激发有关
262 ([Wilson and Fovell, 2018](#))。

263 下面主要针对个例 1，分析 YSUmod 方案对雾模拟的影响。图 3a-c 给出 2016
264 年 12 月 17-20 日葵花-8 卫星反演和地面站观测的雾区分布，两者覆盖范围大致
265 相同。鉴于卫星反演可能存在一定的偏差([王宏斌等, 2018](#); [赵诗童等, 2021](#))，
266 因此评分检验时，我们采用区域内地面自动站逐小时观测结果。17 日夜间华北

267 平原大范围雾形成，大雾日消夜生，20 日白天才彻底消散。本次雾形成前，大
 268 陆高压东移南缩，低空急流引导西南暖湿气流北上，导致华北平原地区逆温层建
 269 立，比湿增加，随着低槽东移，在弱冷空气与长波辐射降温共同作用下形成大雾。
 270 天气图与具体成因之前已有分析 (Tian et al., 2019)，本文不再赘述。

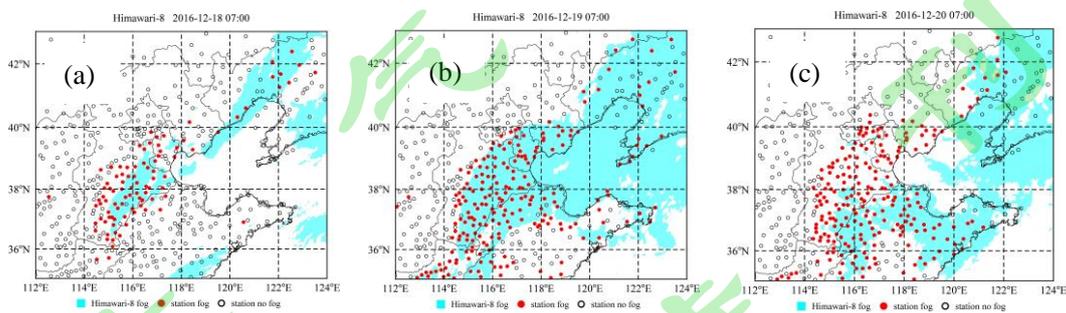
271 结合 Exp_YSU 和 Exp_YSUmod 方案模拟雾区分布 (图 3) 以及 4 种检验评
 272 分指标随时间的变化特征 (图 4)，可知第一阶段 (12 月 17 日 20 时-18 日 15 时)，
 273 两试验评分差异较小，模拟雾区较观测均偏大，FAR 偏大，；第二阶段 (12 月
 274 18 日 17 时-19 日 17 时)，与实况和 Exp_YSU 结果相比，Exp_YSUmod 漏报了河
 275 北中南部和山东中西部的大片雾区，POD 明显偏低，MIS 偏高，导致 TS 评分显
 276 著降低。第三阶段 (12 月 19 日 19 时-20 日 08 时)，Exp_YSUmod 模拟雾区虽有
 277 所增加，但仍然小于 Exp_YSU 模拟结果，并且漏报了山东半岛东部的雾区，导
 278 致 TS 评分依然较 Exp_YSU 结果偏低。这表明增加云/雾顶湍流混合机制后，
 279 YSUmod 方案反而导致漏报现象增多，降低了华北大范围雾的模拟能力。

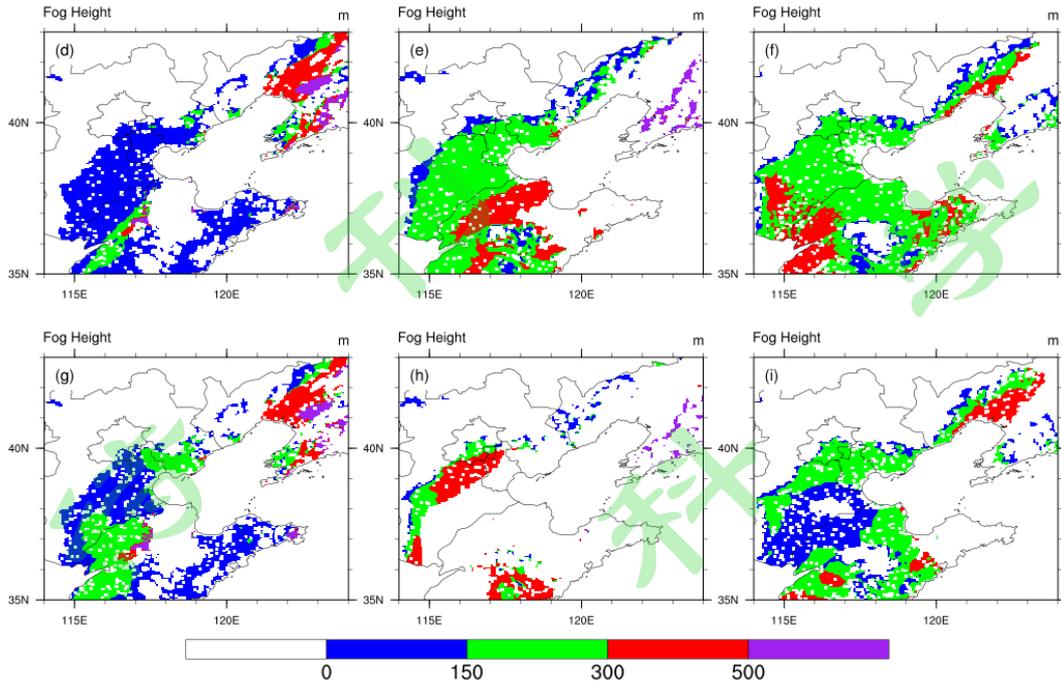
280 表 3 雾区面积检验评分

281 Table 3 Scores of the simulated fog area

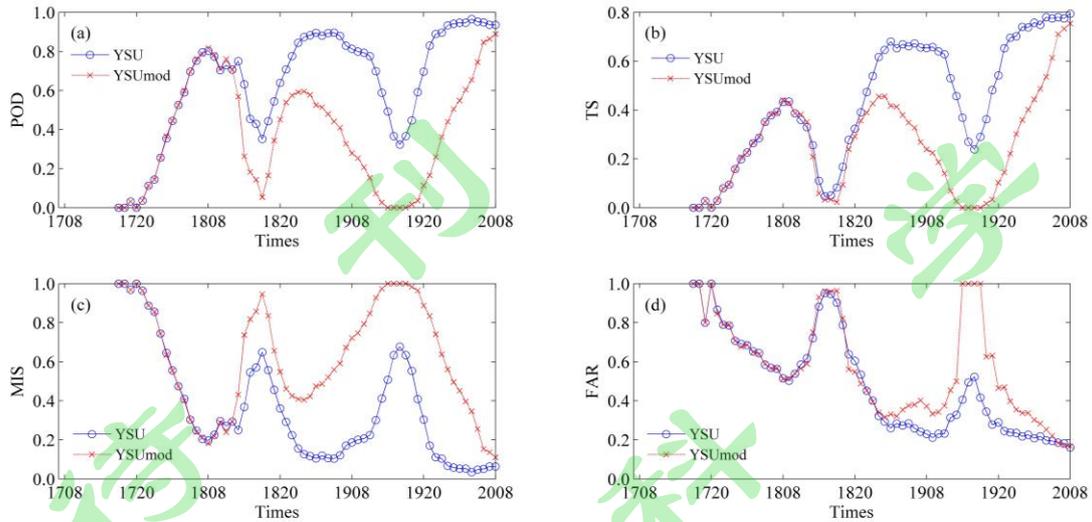
	POD		FAR		MIS		TS	
	YSU	YSUmod	YSU	YSUmod	YSU	YSUmod	YSU	YSUmod
个例 1	0.64	0.38	0.48	0.57	0.36	0.62	0.43	0.26
个例 2	0.33	0.30	0.70	0.66	0.67	0.71	0.19	0.18
个例 3	0.50	0.33	0.66	0.68	0.50	0.67	0.28	0.22
平均	0.49	0.34	0.61	0.64	0.51	0.67	0.30	0.22

282





283 图 3 观测雾区 (第一排) (蓝色阴影为葵花-8 卫星反演雾区, 红色实心圆点为标记的地面站
 284 观测雾区)、Exp_YSU (第二排) 和 Exp_YSUmod (第三排) 模拟的华北地区雾区 (仅显
 285 示陆地雾覆盖, 填色为雾厚度, 单位: m): (a) 2016 年 12 月 18 日 07 时; (b) 2016 年 12
 286 月 19 日 07 时; (c) 2016 年 12 月 20 日 07 时; (d-f)、(g-i) 分别与 (a-c) 时间对应
 287 **Fig.3 Fog areas of Observations (the first row, the blue shadows are the fog areas retrieved**
 288 **from satellite Himawari-8 and the red solid dots are the fog areas observed by ground**
 289 **stations), Exp_YSU (the second row) and Exp_YSUmod (the third row) (only shows land fog**
 290 **simulation, shaded with fog thickness, unit: m): (a) 07:00 BJT 18 December 2016; (b) 07:00**
 291 **BJT 19 December 2016; (c) 07:00 BJT 20 December 2016. The times of (d-f) , (g-i)**
 292 **correspond to (a-c) respectively**



293
294 图 4 2016 年 12 月 17 日 08 时-20 日 08 时 Exp_YSU 和 Exp_YSUmod 方案检验评分对比: (a)
295 POD; (b) FAR; (c) MIS; (d) TS

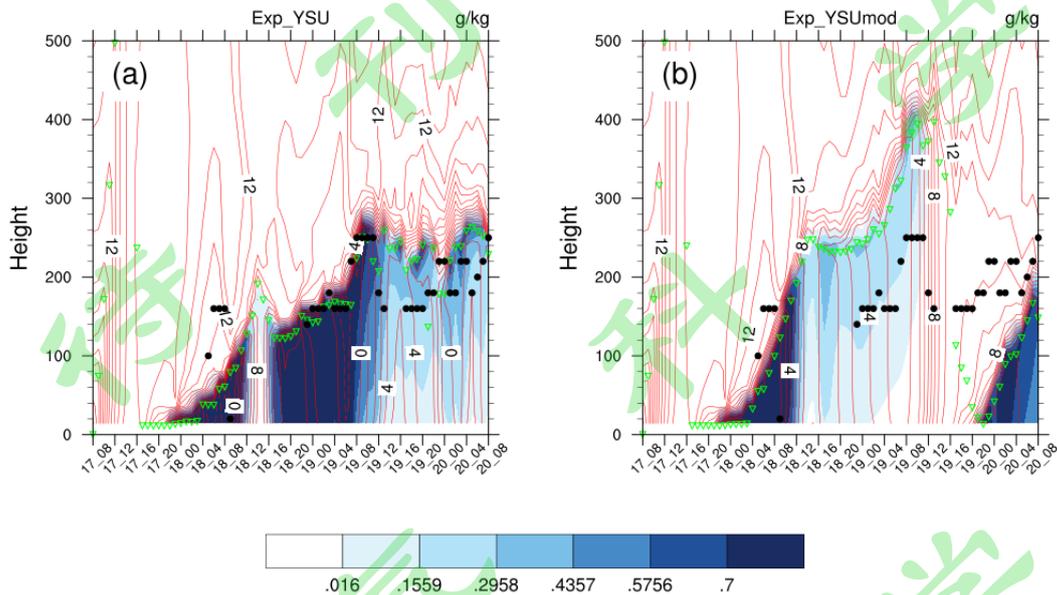
296 **Fig.4 Comparison of test scores of Exp_YSU and Exp_YSUmod from 08:00 BJT 17**
297 **December to 08:00 BJT 20 December 2016: (a) POD; (b) FAR; (c) MIS; (d) TS**

298 4.1.2 雾厚度的检验

299 鉴于 YSUmod 方案旨在改进雾顶夹卷和"自上而下"湍流混合过程,因此其主要
300 要影响体现在雾层的垂直分布。结合天津市大气边界层气象铁塔梯度观测,我
301 们对比分析了 Exp_YSU 和 Exp_YSUmod 试验模拟雾层随时间的垂直发展差异。
302 图 5 为模拟的天津站雾层时间-高度演变,同时叠加了模拟相当位温和大气边界
303 层高度,观测雾顶高度以实心黑点标记,由于大气边界层铁塔高度仅为 250 m,
304 超出 250 m 的雾顶高度仍标记在 250 m 位置上。天津站第一阶段雾形成于 18 日
305 05 时,起始雾高为 100 m,之后逐渐抬升到 160 m 并维持了 3 小时;第二阶段雾
306 形成于 18 日 23 时,起始雾顶为 140 m,此后波动抬升,19 日 07 时以后,雾顶
307 维持在 220 m 以上,一度超过了塔层观测范围。19 日 14-16 时受太阳辐射影响,
308 雾短时消散;19 日 17 时雾重新生成(第三阶段),起始雾顶在 160 m,21 时后
309 雾顶维持在 180-220 m 之间波动,至 20 日 08 时,雾顶升高到 250 m 以上(表 4)。

310 对比雾实况厚度,发现 Exp_YSUmod 模拟的雾顶高度较高,同时液态水含量
311 量(LWC)降低,雾底出现抬升现象,导致第二阶段雾更早消散。具体而言,
312 与 Exp_YSU 模拟相比,Exp_YSUmod 模拟在雾过程的第一和第二阶段雾高分别

313 增厚了 50 m 和 160 m，达到最高 440 m 的雾顶高度。同时，LWC 显著减少，
 314 导致雾逐渐消散。在雾的第三阶段，Exp_YSU 模拟的雾一直维持在大约 200 m
 315 左右高度；而 Exp_YSUmod 模拟的雾重新生成，平均雾顶高度较低。



316
 317

318 图 5 2016 年 12 月 17 日 08 时-20 日 08 时天津站模拟得到的 LWC (填色, 单位: g/kg)、相
 319 当位温 (红色等值线, 单位: °C)、边界层高度 (绿色三角, 单位: m) 的时间-高度剖面图,
 320 (a) Exp_YSU; (b) Exp_YSUmod, 实心黑点为观测雾顶高度

321 **Fig.5 Time-height contour of LWC (color shades, unit: g/kg), equivalent potential**
 322 **temperature (red solid lines, unit: °C) and boundary layer height (green triangle, unit: m)**
 323 **simulated with (a) Exp_YSU and (b) Exp_YSUmod at Tianjin station from 08:00 BJT 17**
 324 **December to 08:00 BJT 20 December 2016. The solid black dots represent the observed fog**
 325 **tops**

326

表 4 三阶段雾顶最大高度对比

327

Table 4 Comparison of maximum fog top height in three stages

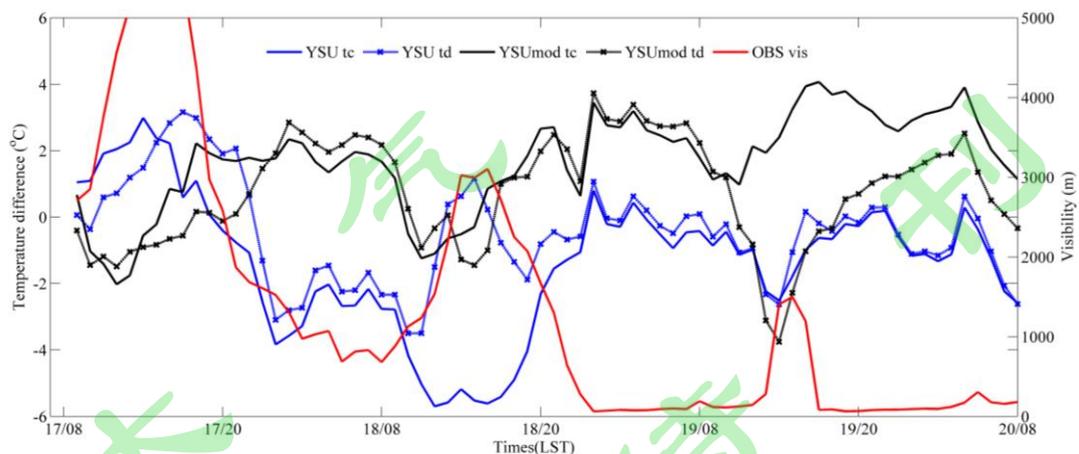
	第一阶段最高雾顶	第二阶段最高雾顶	第三阶段最高雾顶
OBS	160 m	>250 m	> 250 m
Exp_YSU	200 m	280 m	270 m
Exp_YSUmod	250 m	440 m	200 m

328

329 4.2 模拟差异原因分析

330 4.2.1 YSUmod 方案对近地层温、湿度模拟的影响

331 考虑大雾生消对近地层温湿度非常敏感，图 6 给出模拟的天津站 2 m 气温、
332 露点温度与观测实况的差值。结果表明，在雾第一时段，Exp_YSU 模拟的温度、
333 露点温度比实况观测显著偏低，Exp_YSUmod 则明显修正了负偏差，尤其是 18
334 日午后雾时段，Exp_YSUmod 将与实况相差 6°C 左右的温度负偏差修正到 $\pm 1^{\circ}\text{C}$
335 C 左右。在 18 日夜间（雾第二阶段），YSU 方案的负偏差减小到 2°C 以内，
336 Exp_YSUmod 则高估近地面气温 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。由于 Exp_YSUmod 在模拟雾期间 LWC
337 显著降低（图 5b），随着模式积分累积效应，Exp_YSUmod 在前期模拟温度较高
338 基础上对 19 日白天气温高估更加明显，比 Exp_YSU 模拟温度偏高的这一趋势
339 一直保持至积分结束，同时从 19 日 10 时开始，Exp_YSUmod 方案模拟的露点
340 温度和温度差异开始明显增大，露点温度持续偏低和温度偏高共同导致温度露点
341 差在 19 日 15 时达到了 6°C ，这是导致两方案对第三阶段雾模拟存在较大差异
342 的根本原因。总的来说，Exp_YSU 在雾第一阶段不真实的降温率虽然促使模拟
343 大雾形成，减少漏报率，但与观测相比，部分时段负偏差过大；Exp_YSUmod
344 修正了雾过程第一阶段的温度负偏差，但此后模拟温度均较观测偏高 2°C 左右，
345 露点温度差增大，雾更容易消散。



346

347 图 6 2016 年 12 月 17 日 08 时-20 日 08 时天津站 YSU 方案（蓝色线）和 YSUmod 方案（黑
348 色线）模拟-观测得到的 2 m 温度差（实线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）、露点温度差（带叉虚线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ），

349

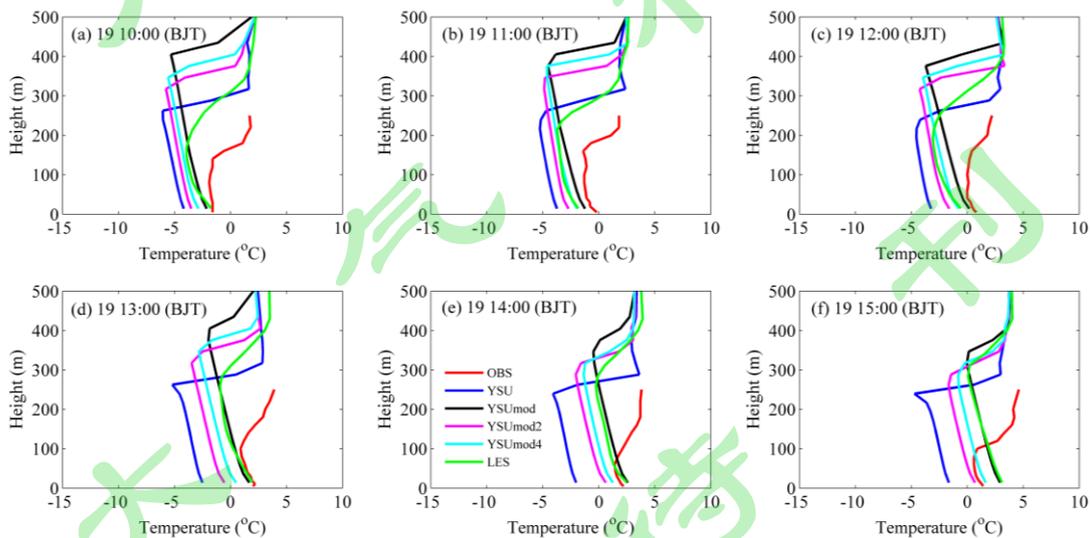
以及观测大气能见度（红色实线，单位：m）

350 **Fig.6 2 m temperature difference (solid lines, unit: °C), dew point difference (dotted lines**
 351 **with cross, unit: °C) obtained from YSU (blue lines) and YSUmod scheme (black lines)**
 352 **simulated results minus observations in Tianjin station from at 08:00 BJT 17 December 17**
 353 **to 08:00 BJT 20 December 2016. The red line represents the observed visibility (unit: m)**

354 4.2.2 YSUmod 方案对边界层结构模拟的影响

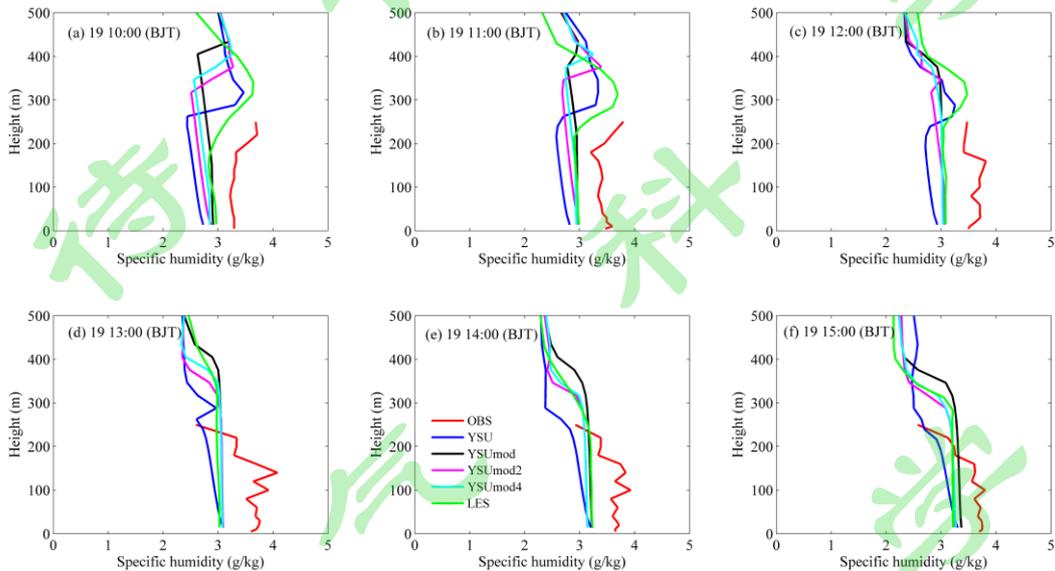
355 图 7-8 展示了雾第二阶段，铁塔 15 层梯度观测、Exp_LES、Exp_YSU 和
 356 Exp_YSUmod 模拟的边界层结构随时间的变化。Exp_LES 模拟显示其温湿度廓
 357 线和混合层高度整体上更接近实况观测。对比 Exp_YSUmod 和 Exp_YSU 的差异，
 358 发现 *ysu_topdown_mixing* 模块可使雾层内部升温 3~5° C，比湿增加 0.3-0.5 g/kg。
 359 Exp_YSUmod 模拟雾层内温湿度均更接近 Exp_LES 和实况观测，但对雾层上部的
 360 温湿度模拟均明显偏低。此外，Exp_YSUmod 模拟的混合层高度明显偏高约
 361 150 米，而 Exp_YSU 的混合层高度更接近观测和 Exp_LES 模拟。

362 这些结果表明雾顶冷却引起的夹卷可能过强，导致上层更多暖空气向下输送
 363 进入相对冷的雾层，促进雾顶高度抬升，同时 LWC 明显下降（图 5b）。因此
 364 Exp_YSUmod 模拟的雾水消散更早，雾持续时间更短（图 3h），导致雾覆盖面积
 365 的逐时评估结果偏离实际观测。



366 图 7 天津铁塔观测和模拟的温度廓线：2016 年 12 月 19 日 (a) 10 时 (BJT)；(b) 11 时；
 367 (c) 12 时；(d) 13 时；(e) 14 时；(f) 15 时。红、蓝、黑、紫、青和绿色线分别代表观
 368 测、Exp_YSU、Exp_YSUmod、Exp_YSUmod2、Exp_YSUmod4 和 Exp_LES
 369

370 **Fig.7 Observed and simulated temperature profile: (a) 10:00 BJT; (b) 11:00 BJT; (c) 12:00**
 371 **BJT; (d) 13:00 BJT; (e) 14:00 BJT; (f) 15:00 BJT 19 December 2016. The red, blue, black,**
 372 **purple, cyan and green lines represent OBS, Exp_YSU, Exp_YSUmod, Exp_YSUmod2,**
 373 **Exp_YSUmod4 and Exp_LES respectively**



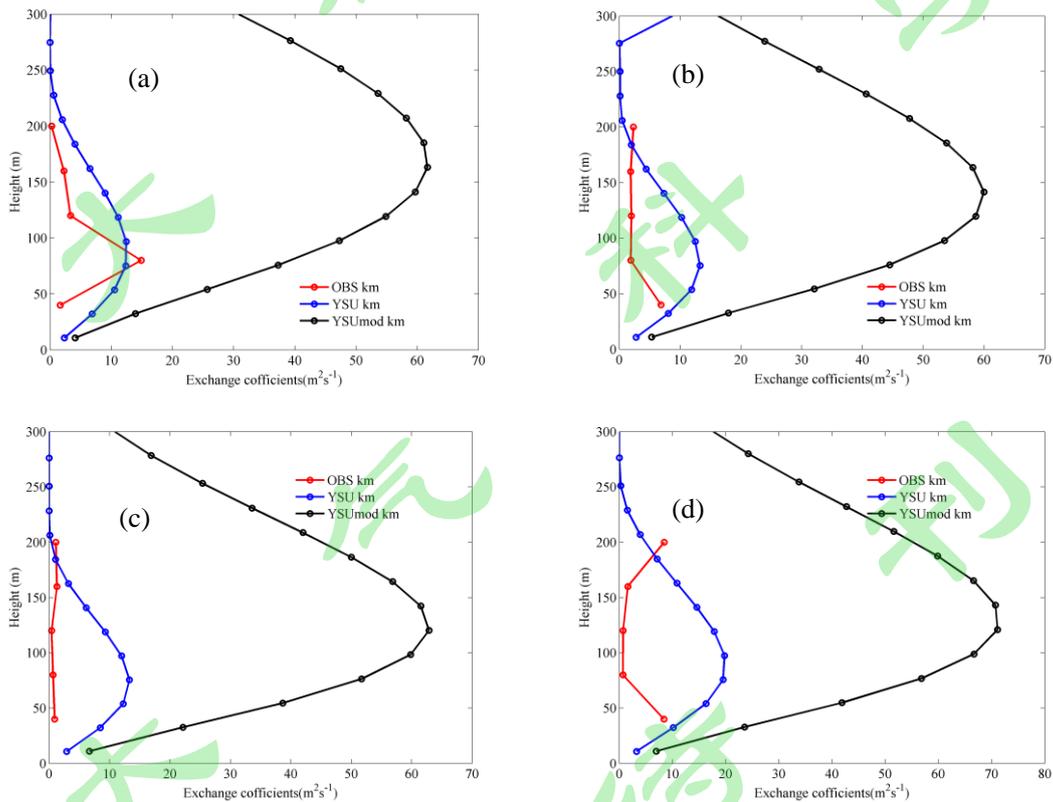
374
 375 **图 8 天津铁塔观测和模拟的比湿廓线：2016 年 12 月 19 日 (a) 10 时 (BJT)；(b) 11 时；**
 376 **(c) 12 时；(d) 13 时；(e) 14 时；(f) 15 时。红、蓝、黑、紫、青和绿色线分别代表观**
 377 **测、Exp_YSU、Exp_YSUmod、Exp_YSUmod2、Exp_YSUmod4 和 Exp_LES**

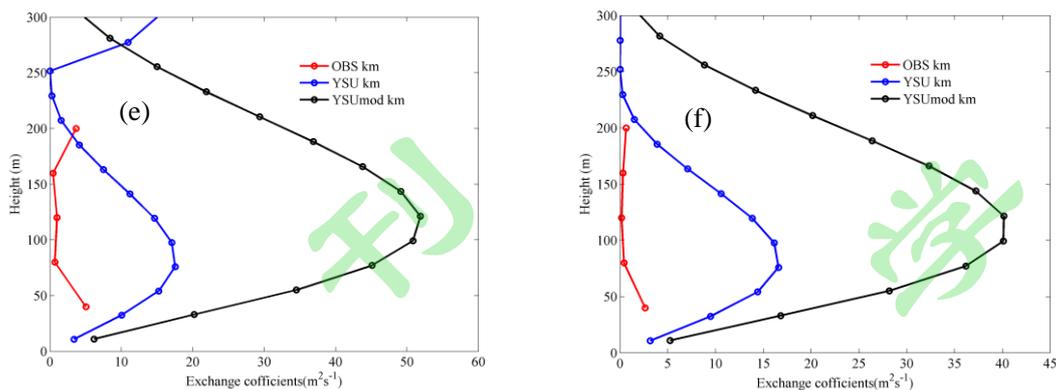
378 **Fig.8 Observed and simulated specific humidity profile: (a) 10:00 BJT; (b) 11:00 BJT; (c)**
 379 **12:00 BJT; (d) 13:00 BJT; (e) 14:00 BJT; (f) 15:00 BJT 19 December 2016. The red, blue,**
 380 **black, purple, cyan and green lines represent OBS, Exp_YSU, Exp_YSUmod,**
 381 **Exp_YSUmod2, Exp_YSUmod4 and Exp_LES respectively**

382 4.2.3 YSUmod 方案对边界层湍流扩散系数模拟的影响

383 本节进一步利用 5 层涡动相关资料验证上一节的猜想。图 9 显示了雾第二阶段，
 384 天津市大气边界层铁塔观测与模拟的湍流扩散系数 (K_m) 随时间变化，可
 385 以发现：Exp_YSUmod 较 Exp_YSU 显著增强了 K_m ，使得雾层内的湍流混合更
 386 加充分。与实况相比，Exp_YSUmod 模拟的雾顶湍流强度过大，导致混合层明
 387 显增高，雾顶抬升速度过快，大雾很快消散。具体来说，19 日 10 时（图 9a），

388 观测 K_m 最大值位于 80 m 高度处, 强度为 $15 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, Exp_YSU 得到的 K_m 最大值
 389 所在高度和强度, 均与观测较为一致。Exp_YSUmod 得到的 K_m 最大值位于 160 m
 390 高度处, 强度超过 $60 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, 远高于观测。此后 Exp_YSUmod 给出的 K_m 一直维
 391 持在较高水平 (图 9b-f), Exp_YSU 的 K_m 虽然也随时间逐渐增强, 但其增长趋
 392 势远小于 Exp_YSU。该结果验证了上节的推测, 即: YSUmod 方案造成雾区漏
 393 报和雾持续时间偏短的主要原因是雾顶夹卷过强, 将雾顶之上自由大气中更多的
 394 暖空气夹卷进入雾体内, 导致雾层增暖以及混合层高度抬升, 雾水蒸发, LWC
 395 减小, 白天则会因此有更多短波辐射进入雾体, 致使增温更加明显。总之, 因为
 396 存在雾顶湍流夹卷过强->上层过多暖空气进入雾体上部->混合层抬升且雾体内
 397 温度增加->雾体内液态水含量减小的反馈机制, 导致 YSUmod 方案模拟雾层过
 398 快抬升且低层雾过早消散。虽然 LWC 减小后, 雾顶长波辐射冷却也会减小, 因
 399 此其驱动的雾顶湍流夹卷也呈减小趋势 (图 9e-f), 但 YSUmod 方案的夹卷强度
 400 数值仍然超过了 YSU 方案和实况观测。





401 图9 天津铁塔观测和模拟的动量湍流扩散系数廓线 (K_m): 2016年12月19日 (a) 10时
 402 (BJT); (b) 11时; (c) 12时; (d) 13时; (e) 14时; (f) 15时。红色线、蓝色线和黑
 403 色线分别代表观测、Exp_YSU和Exp_YSUmod

404 Fig.9 Observed and simulated eddy diffusivity profile (K_m): (a) 10:00 BJT; (b) 11:00 BJT; (c)
 405 12:00 BJT; (d) 13:00 BJT; (e) 14:00 BJT; (f) 15:00 BJT 19 December 2016. The red, blue and
 406 black lines represent OBS, Exp_YSU scheme and Exp_YSUmod scheme respectively

407 3.3 ysu_topdown_pblmix 雾顶夹卷强度的敏感性试验

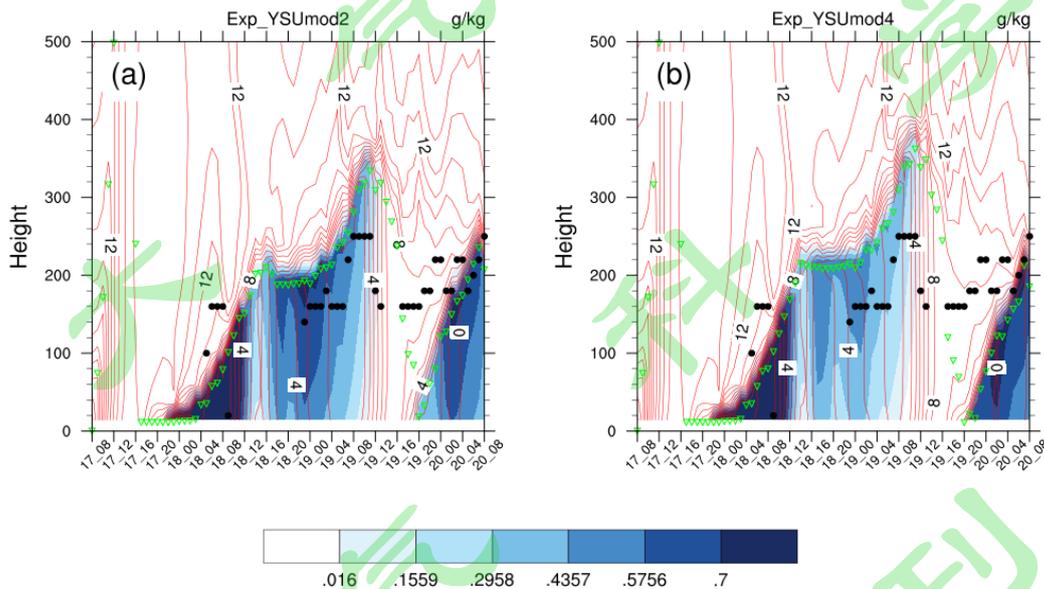
408 根据前两小节分析,考虑雾顶夹卷对华北平原雾生消发展的重要作用,我
 409 们开展调整夹卷强度的敏感性试验,以此来阐述表征夹卷强度的系数变化对
 410 ysu_topdown_pblmix 模拟雾区面积和雾持续时间的影响。

411 ysu_topdown_pblmix 模块中的蒸发增强系数 a_2 决定了云/雾顶夹卷效率 A (详
 412 见 2.1 节),层云研究中 a_2 取值为 60 (Nicholls and Turton, 1986),层积云中为 15
 413 (Stevens et al., 2005; Caldwell et al., 2005; Bretherton et al., 2007), Wilson and
 414 Fovell (2018) 在陆地山谷雾的研究中,依据 LES 模拟将该值下调到 8。既然云
 415 顶夹卷效率仍然偏高,我们尝试通过继续减小蒸发增强系数 a_2 ,从而减小夹卷效
 416 率 A ,以此来降低雾顶夹卷强度。本文将系数 a_2 调整为 2 和 4,试验分别命名为
 417 Exp_YSUmod2 和 Exp_YSUmod4,并重新测试修改后的 Exp_YSUmod 方案的模
 418 拟效果。

419 从模拟的边界层结构来看(图 7-8),两组敏感性试验与 Exp_YSUmod 相比,
 420 混合层高度和雾顶湿度廓线都有明显改进,结合雾层时间-高度演变可知(图 10),
 421 调整 $a_2=4$ 后,第二阶段最大雾顶高度下降了 40 m;调整为 $a_2=2$ 后,雾顶高度继

422 续下降 20 m，说明混合层厚度被合理降低，雾顶与观测实况更为接近。混合层
 423 高度降低后，Exp_YSUmod4 试验得到的雾顶湿度廓线与 LES 结果基本一致（图
 424 8d-f），Exp_YSUmod2 则略偏小。此外，两敏感性试验的雾体内 LWC 也明显增
 425 加。

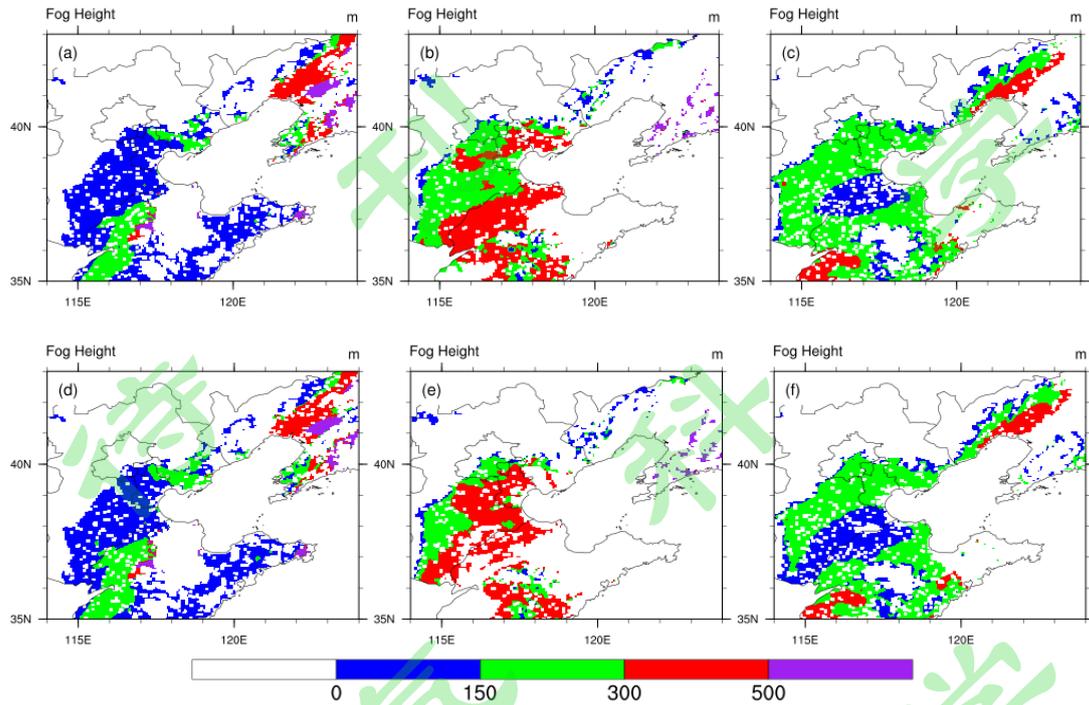
426 进一步地，区域检验结果表明，雾覆盖面积也得到了显著改善（图 11），尤
 427 其是雾的第二阶段，与图 3h 中的 Exp_YSUmod 模拟结果相比，两敏感性试验的
 428 雾区面积均显著扩大，其中调整 $a_2=2$ 后，显示的雾区面积（图 11b）较观测（图
 429 3b）偏大，调整 $a_2=4$ 后雾区面积（图 11e）与观测基本一致。与 Exp_YSUmod
 430 试验相比，Exp_YSUmod4 试验得到的雾区面积评分 POD 增加 0.10，FAR 减少
 431 0.04，MIS 减少 0.10，TS 增加 0.06。总的来说，敏感性试验证明，减小 a_2 的确
 432 起到了削弱夹卷湍流强度的作用，可有效改善 YSUmod 方案对雾顶高度和雾覆
 433 盖面积的模拟结果，推荐 $a_2=4$ 更符合观测和 LES 模拟。



434
 435 图 10 2016 年 12 月 17 日 08 时-20 日 08 时天津站调整参数后模拟得到的 LWC(填色,单位:
 436 g/kg)、相当位温(红色等值线,单位: °C)、边界层高度(绿色三角,单位: m)的时间-
 437 高度剖面图 (a) Exp_YSUmod2; (b) Exp_YSUmod4, 实心黑点为观测雾顶高度

438 **Fig.10 Time-height contour of LWC (color shades, unit: g/kg), equivalent potential**
 439 **temperature (red solid lines, unit: °C) and boundary layer height (green triangle, unit: m)**
 440 **simulated after modification of parameters with (a) Exp_YSUmod2 and (b) Exp_YSUmod4**
 441 **at Tianjin station from 08:00 BJT 17 December to 08:00 BJT 20 December 2016. The solid**

black dots represent the observed fog tops



443 图 11 Exp_YSUmod2 (第一排), Exp_YSUmod4 (第二排) 试验模拟得到的华北地区雾区
 444 面积 (填色为雾厚度, 单位 m): (a) 2016 年 12 月 18 日 07 时; (b) 2016 年 12 月 19 日 07
 445 时; (c) 2016 年 12 月 20 日 07 时; (d-f) 与 (a-c) 时间对应;

446 Fig.11 Fog area of Exp_YSUmod2 (the first row) , Exp_YSUmod4 (the second row) (shaded
 447 with fog thickness, unit: m): (a) 07:00 BJT 18 December 2016; (b) 07:00 BJT 19 December
 448 2016; (c) 07:00 BJT 20 December 2016. The times of (d-f) correspond to (a-c)

449 5.结论和讨论

450 本文利用附加 *ysu_topdown_pblmix* 模块的 YSU 大气边界层方案 (YSUmod),
 451 对华北三次大雾过程开展数值模拟, 并着重分析了 YSUmod 方案对 2016 年 12
 452 月 17-20 日华北一次大范围锋面雾过程的模拟影响。结合葵花-8 卫星反演资料、
 453 367 个华北地面自动站观测资料、大气边界层观测塔 15 层梯度、5 层涡动相关观
 454 测以及 LES 模拟结果, 检验了模拟与实况雾区面积、高度、持续时间的差异,
 455 分析了差异可能存在的原因, 并对夹卷参数进行了本地化调整, 得到主要结论如
 456 下:

457 (1) 对雾区面积、雾顶高度和雾持续时间的检验表明, 与 YSU 方案相比,

458 YSUmod 方案整体降低了华北大雾的雾区模拟评分，表现为 POD 下降、FAR 和
459 MIS 上升，TS 评分显著下降；高估了雾的厚度；雾持续时间变短。

460 (2) 虽然 YSUmod 方案降低了雾区模拟评分，但它却明显改进了雾边界层
461 层温湿度模拟，更接近观测事实与 LES 模拟。YSUmod 方案将云/雾顶湍流混合
462 机制引入模式，可以有效缓解过快降温产生的模拟偏差，但雾顶夹卷过强，会导
463 致过多暖空气进入雾体，造成混合层偏高、模拟雾区面积减小和雾持续时间偏短。

464 (3) 通过减小蒸发增强系数 a_2 来降低模拟雾顶夹卷强度，可以一定程度缓
465 解模拟雾顶湍流混合过强的问题，推荐华北大雾模拟中 a_2 调整为 4，参数调整后
466 的 YSUmod 方案对雾覆盖面积、雾顶高度和雾持续时间的模拟均更接近观测事
467 实。

468 虽然本工作针对雾顶夹卷的改进没有从理论上解决 YSUmod 方案对华北大
469 雾漏报率增加的问题，但提供了业务应用如何改进雾预报的思路。从物理机制上
470 讲，模式应该包含雾顶辐射冷却引起的雾顶湍流混合，YSUmod 方案模拟雾层温
471 湿度结果比 YSU 方案更接近观测事实，也证实了雾模拟过程有必要引入雾顶“自
472 上而下”的热力湍流机制。但 YSUmod 方案在华北雾应用中高估了雾顶夹卷强
473 度和混合层高度，导致雾模拟能力降低的问题需要进一步寻求解决方案。未来计
474 划从 3 个方面去探索：一是设置日变化的蒸发增强系数，以改进白天短波辐射导
475 致的雾顶湍流过强问题；二是调整混合层高度的计算方法，使其与实际观测更为
476 一致；三是根据不同下垫面类型区别计算雾顶“自上而下”的热力湍流，使得加
477 入该物理过程后能普遍提高大雾模拟能力。本文旨在初步探索如何显式刻画雾层
478 “自上而下”热力湍流物理机制，以提高华北平原雾模拟能力。未来需要进一步
479 深入检验和改进该方案。

480

481 参考文献：

482 Bretherton C S, Blossey P N, Uchida J. 2007. Cloud droplet sedimentation, entrainment
483 efficiency, and sub-tropical stratocumulus, entrainment efficiency, and sub-tropical stratocumulus
484 albedo [J]. Geophys. Res. Lett., 34: L03813.

485 Caldwell P, Bretherton C S, Wood R. 2005. Mixed-layer budget analysis of the diurnal cycle
486 of entrainment in SE Pacific stratocumulus [J]. J. Atmos. Sci., 62: 3775-3791.

487 Cao Z Q, Sheng L F, Liu Q, et al. 2015. Interannual increase of regional haze-fog in North
488 China Plain in summer by intensified easterly winds and orographic forcing [J]. *Atmos. Environ.*,
489 122: 154-162.

490 陈东辉, 尚可政, 赵中军, 等. 2015. 环渤海地区雾特征及其影响因子分析 [J]. *气象与*
491 *环境学报*, 31(4): 74-81. Chen Donghui, Shang Kezheng, Zhao Zhongjun, et al. 2015.
492 Characteristics of fog and its influence factors around the Bohai coastal areas [J]. *Journal of*
493 *Meteorology and Environment (in Chinese)*, 31(4): 74-81.

494 崔驰潇, 包云轩, 袁成松, 等. 2018. 不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程
495 的模拟影响 [J]. *大气科学*, 42(6): 1344-1362. Cui Chixiao, Bao Yunxuan, Yuan Chengsong, et al.
496 2018. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an
497 advection fog process in Jiangsu [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(6):
498 1344-1362.

499 Deardorff J W. 1980. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional
500 model [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 18(4): 495-527.

501 Driedonks A G M, Duynkerke P G. 1989. Current problems in the stratocumulus-topped
502 atmospheric boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 46: 275-303.

503 Dudhia J. 1996. A multi-layer soil temperature model for MM5 [C]. *The Sixth PSU/NCAR*
504 *Mesoscale Model User's Workshop*, Boulder, Colorado, 22-24.

505 Dayal K K, Cater J E, Kingan M J, et al. 2020. Evaluation of the WRF model for simulating
506 surface winds and the diurnal cycle of wind speed for the small island state of Fiji [C]. *Journal of*
507 *Physics: Conference Series*, 1618: 062025.

508 Ellord G P. 1995. Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES
509 multispectral infrared imagery [J]. *Wea. Forecasting*, 10(3): 606-619.

510 Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements
511 [J]. *Agr. Forest. Meteorol.*, 78: 83-105.

512 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等. 2016. 中国海雾研究简要回顾 [J]. *气象科技进展*, 6(2): 20-28.
513 Fu Gang, Li Pengyuan, Zhang Suping, et al. 2016. A brief overview of the sea fog study in China
514 [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*. 6(2): 20-28.

515 Gao S H, Lin H, Shen B, et al. 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March

516 2005: Analysis and numerical modeling [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24: 65-81.

517 Gao S H, Wu W, Zhu L L, et al. 2009. Detection of nighttime sea fog/stratus over the
518 Huang-hai Sea using MTSAT-1R IR data [J]. *Acta. Oceanol. Sin.*, 28(2): 23-35.

519 Gao S, Lu C S, Liu Y G, et al. 2021. Comprehensive quantification of height dependence of
520 entrainment mixing between stratiform cloud top and environment [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 21:
521 11225-11241.

522 Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: a review of past
523 achievements and future perspectives [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 164: 1121-1159.

524 郭丽君, 郭学良. 2016. 北京 2009~2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因
525 [J]. *大气科学*, 40(2): 296-310. Guo Lijun, Guo Xueliang. 2016. The type, vertical structure and
526 physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009-2013 in the Beijing
527 region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(2): 296-310.

528 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与
529 数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 33(6): 1174-1186. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al.
530 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation,
531 dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric
532 Sciences (in Chinese)*, 33(6): 1174-1186.

533 He J Y, Chan P W, Li Q S, et al. 2021. Observation of vertical eddy diffusivity and mixing
534 length during landfalling Super Typhoons [J]. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.*, 219: 104816.

535 Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit
536 treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 2318-2341.

537 Hu X M, Klein P M, Xue M. 2013. Evaluation of the updated YSU planetary boundary layer
538 scheme within WRF for wind resource and air quality assessments [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 118:
539 10490-10505.

540 黄健, 王斌, 周发琇, 等. 2010. 华南沿海暖海雾过程中的湍流热量交换特征 [J]. *大气
541 科学*, 34(4): 715-725. Huang J, Wang B, Zhou F X, et al. 2013. Turbulent heat exchange in a
542 warm sea fog event on the coast of the South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences
543 (in Chinese)*, 34(4): 715-725.

544 Huang H J, Liu H N, Jiang W M, et al. 2011. Characteristics of the boundary layer structure

545 of sea fog on the coast of Southern China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(6): 1377-1389.

546 Huang H J, Liu H N, Huang J, et al. 2015. Atmospheric boundary layer structure and
547 turbulence during sea fog on the Southern China coast [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143(5): 1907-1923.

548 黄翊, 彭新东. 2017. 边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响 [J]. *大气科学*, 41(3):
549 533-543. Huang Yi, Peng Xindong. 2017. The impact of an improved planetary boundary layer
550 parameterization scheme on the simulation of fog [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*
551 (in Chinese), 41(3): 533-543.

552 Jahn D E, Takle S, William A G J. 2017. Improving wind-ramp forecasts in the stable
553 boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 163: 423-446.

554 Jahn D E, William A G J. 2018. Impacts of modifications to a local planetary boundary layer
555 scheme on forecasts of the Great Plains low-level jet environment [J]. *Wea. Forecasting*, 33(5):
556 1109-1120.

557 Jia X, Quan J, Zheng Z, et al. 2019. Impacts of anthropogenic aerosols on fog in North China
558 Plain [J]. *J. Geophys. Res: Atmospheres*, 124(1): 252-265.

559 姜昊宇. 2021. 陆雾消散过程中雾顶夹卷作用的数值研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位
560 论文, 61pp. Jiang Haoyu. 2021. Numerical study on the fog-top entrainment in the process of land
561 fog dissipation [D]. M.S. thesis (in Chinese), Ocean University of China.

562 姜昊宇, 高山红. 2021. 两种陆面方案对陆雾与海雾模拟效果的对比研究 [J]. *海洋气象*
563 *学报*, 41(1): 30-44. Jiang Haoyu, Gao Shanhong. 2021. Comparison of simulation effects between
564 two land surface schemes on land fog and sea fog [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 41(1):
565 30-44.

566 Jiang J, Yan W, Ma S, et al. 2015. Three cases of a new multichannel threshold technique to
567 detect fog/low stratus during nighttime using SNPP data [J]. *Wea. Forecasting*, 30(6): 1763-1780.

568 金莉莉, 何清, 李振杰, 等. 2016. 乌鲁木齐市气象塔梯度观测资料质量控制与处理 [J].
569 *气象*, 42(6): 732-742. Jin Lili, He Qing, Li Zhenjie, et al. 2016. Quality control method and
570 treatment for Urumqi meteorology tower gradient observation data [J]. *Meteor. Mon.*, 42(6):
571 732-742.

572 Kim S H, Suh M S, Han J H. 2018. Development of fog detection algorithm during nighttime
573 using Himawari-8/AHI satellite and ground observation data [J]. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 55(1):

574 337-350.

575 Koračin D, Dorman C E, Lewis J M, et al. 2014. Marine fog: A review. *Atmospheric*
576 *Research* [J]. 143: 142-175.

577 Koračin D, Dorman C E. 2017. *Marine fog: Challenges and advancements in observations,*
578 *modeling, and forecasting* [M]. Switzerland: Springer International Publishing.

579 Lee E-H, Lee E, Park R, et al. 2018. Impact of turbulent mixing in the stratocumulus-topped
580 boundary layer on numerical weather prediction [J]. *Asia-Pac.J.Atmos.Sci.*, 54: 371-384.

581 Lewis J M, Koračin D, Redmond K.T. 2004. Sea fog research in the United Kingdom and
582 United States: a history essay including outlook [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83(3): 395-408.

583 Lim K-S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud
584 microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for Weather and Climate
585 Models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 1587-1612.

586 Liu Q, Wang Z Y, Wu B G, et al. 2021. Microphysics of fog bursting in polluted urban air [J].
587 *Atmos. Environ.*, 253: 118357.

588 李子华, 黄建平. 1999. 辐射雾发展的爆发性特征 [J]. *大气科学*, 23(5): 623-631. Li
589 Zihua, Huang Jianping. 1999. Burst characteristics during the development of radiation fog [J].
590 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 23(5): 623-631.

591 Lock A P, Brown A R, Bush M R, et al., 2000. A new boundary layer mixing scheme. Part I:
592 Scheme description and single-column model tests [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 3187-3199.

593 卢绪兰, 彭新东. 2021. 尺度自适应大气边界层参数化改进及其对一次海雾的数值模拟
594 研究 [J]. *气象学报*, 79(1): 119-131. Lu Xulan, Peng Xindong. 2021. Scale-aware
595 parameterization of atmospheric planetary boundary layer and its application to sea fog simulation
596 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 79(1): 119-131.

597 Matsui T, Zhang S Q, Lang S E, et al. 2018. Impact of radiation frequency, precipitation
598 radiative forcing, and radiation column aggregation on convection-permitting West African
599 monsoon simulations [J]. *Climate Dyn.*, 55: 193-213.

600 Nicholls S, Turton J D. 1986. An observational study of the structure of stratiform cloud
601 sheets. Part II: Entrainment [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112: 461-480.

602 Nieuwstadt F T M. 1984. The turbulent structure of the stable, nocturnal boundary layer [J]. *J.*

603 Atmos. Sci., 41: 2202–2216.

604 牛生杰, 陆春松, 吕晶晶等. (2016). 近年来中国雾研究进展 [J]. 气象科技进展, 6(2),
605 6-19. Niu Shengjie, Lu Chunsong, Lü Jingjing, et al. 2016. Advances in fog research in China [J].
606 Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese). 6(2): 6-19.

607 Noh Y W, Cheon W S, Hong S Y, et al. 2003. Improvement of the K-profile model for the
608 planetary boundary layer based on large eddy simulation data [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 107:
609 401-427.

610 Quan J, Zhang Q, He H, et al. 2011. Analysis of the formation of fog and haze in North China
611 Plain(NCP) [J]. Atmos. Chem. Phys., 11(15): 8205-8214.

612 Steeneveld G J, Ronda R J, Holtslag A A M. 2015. The challenge of forecasting the onset and
613 development of radiation fog using mesoscale atmospheric models [J]. Bound. -Layer Meteor.,
614 154: 265-289.

615 孙戩, 牛涛, 乔林, 等. 2016. 华北地区雾和霾天气环流特征聚类分析 [J]. 气候与环境
616 研究, 21(5): 601-613. Sun Yu, Niu Tao, Qiao Lin, et al. 2016. Cluster analysis of the circulation
617 situation occurring during fog and haze weather in North China [J]. Climatic and Environmental
618 Research (in Chinese), 21(5): 601-613.

619 Tewari M, Chen F, Wang W, et al. 2004. Implementation and verification of the unified
620 NOAH land surface model in the WRF model [C]. 20th Conference on Weather Analysis and
621 Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, 11–15.

622 田梦, 吴彬贵, 黄鹤, 等. 2020. 环渤海近海岸雾产生的天气条件及边界层特征分析 [J].
623 气候与环境研究, 25(2): 199-210. Tian Meng, Wu Bingui, Huang He. 2020. The synoptic
624 condition and boundary layer characteristics of coastal fog around the Bohai Sea [J]. Climatic and
625 Environmental Research (in Chinese), 25(2): 199-210.

626 Tian M, Wu B G, Huang H, et al. 2019. Impact of water vapor transfer on a
627 Circum-Bohai-Sea heavy fog: Observation and numerical simulation [J]. Atmospheric Research,
628 229: 1-22.

629 Van Meijgaard E, Van Ulden A P. 1998. A first order mixing-condensation scheme for
630 nocturnal stratocumulus [J]. Atmospheric Research, 45: 253-273.

631 王宏斌, 张志薇, 刘端阳, 等. 2018. 基于葵花 8 号新一代静止气象卫星的夜间雾识别.

632 高原气象, 37(6), 1749-1764. Wang Hongbin, Zhang Zhiwei, Liu Duanyang, et al. 2018. Detection
633 of fog at night by using the new geostationary satellite Himawari-8 [J]. Plateau Meteorology,
634 37(6): 1749-1764.

635 Weber R. 1999. Remarks on the definition and estimation of friction velocity [J]. Bound. -
636 Layer Meteor., 93(2):197-209.

637 Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J].
638 Bound. -Layer Meteor., 99: 127-150.

639 Wilson T H, Fovell R G. 2018. Modeling the evolution and life cycle of radiative cold pools
640 and fog [J]. Wea. Forecasting, 33(1): 203-220.

641 Wyngaard J C, Brost R A. 1984. Top-down and bottom-up diffusion of a scalar in the
642 convective boundary layer [J]. J. Atmos. Sci., 41: 102-112.

643 Wu B G, Li Z F, Ju T T, et al. 2020. Characteristics of low-level jets during 2015-2016 and
644 the effect on fog in Tianjin [J]. Atmospheric Research, 245: 105102.

645 吴彬贵, 张宏升, 汪靖, 等. 2009. 一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析
646 [J]. 高原气象, 28(2): 258-267. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Wang Jing, et al. 2009.
647 Characteristics of the inversion and the water vapor transport during a duration fog event [J].
648 Plateau Meteorology (in Chinese), 28(2): 258-267.

649 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 2010. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征 [J]. 大
650 气科学, 34(2): 440-448. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Zhang Changchun, et al. 2010.
651 Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in
652 North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(2): 440-448.

653 吴彬贵, 张宏升, 王兆宇, 等. 2011. 平流雾过程湍流微结构与能量输送的分析研究 [J].
654 北京大学学报 (自然科学版), 47(2): 295-301. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Wang Zhaoyu, et
655 al. 2011. Study on turbulent structures and energy transfer during an advective fog period [J]. Acta
656 Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 47(2): 295-301.

657 许健民, 张文建, 杨军, 等. 2008. 风云二号卫星业务产品与卫星数据格式实用手册 [M].
658 北京: 气象出版社, 60-63. Xu Jianmin, Zhang Wenjian, Yang Jun, et al. 2008. Fengyun-2 satellite
659 operational products and satellite data format practical manual (in Chinese) [M]. Beijing: China
660 Meteorological Press, 60-63.

661 Yang Y, Hu X M, Gao S H, et al. 2018. Sensitivity of WRF simulations with the YSU PBL
662 scheme to the lowest model level height for a sea fog event over the Yellow Sea [J]. Atmospheric
663 Research, 215: 253-267.

664 Yang Y, Gao S H. 2020. The impact of turbulent diffusion driven by fog-top cooling on sea
665 fog development [J]. J.Geophys.Res-Atmos., 125(4): e2019JD031562.

666 Ye X X, Wu B G, Zhang H S, et al. 2015. The turbulent structure and transport in fog layers
667 observed over the Tianjin area [J]. Atmospheric Research, 153: 217-234.

668 Ye X X, Song Y, Cai X H, et al. 2016. Study on the synoptic flow patterns and boundary
669 layer process of the severe haze events over the North China Plain in January 2013 [J]. Atmos.
670 Environ, 124: 129-145.

671 Yu J W, Wang Y, Liu M. 2020. Mechanisms of an extreme fog and haze event in the
672 megacities of central and eastern China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 133: 123-139.

673 张翠艳, 阎琦, 白雪, 等. 2020. 1999-2018 年锦州地区大雾气候特征及成因分析 [J]. 气
674 象与环境学报, 36(3): 87-92. Zhang Cui-yan, Yan Qi, Bai Xue, et al. 2020. Climate characteristics
675 and causes of heavy fog in Jinzhou from 1999 to 2018 [J]. Journal of Meteorology and
676 Environment, 36(3): 87-92.

677 张大林. 1998. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用 [J]. 大气科学, 22(4):
678 548-561. Zhang Da Lin. 1998. Roles of various diabatic physical processes in mesoscale models
679 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 22(4): 548-561.

680 张人禾, 李强, 张若楠. 2013. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分
681 析 [J]. 中国科学: 地球科学, 57: 26-35. Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. 2013.
682 Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in
683 January 2013 [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 57: 26-35.

684 赵诗童, 时晓蒙, 吴晓京, 等. 2021. 三种经典夜间陆地雾遥感反演方法的适用性对比分
685 析 [J]. 海洋气象学报, 41(1): 45-57. Zhao Shitong, Shi Xiaomeng, Wu Xiaojing, et al.
686 Applicability comparison of three classical remote sensing retrieval methods for nighttime land
687 fog [J]. Journal of Marine Meteorology, 41(1): 45-57.

688 Zhou B, Du J, Gultepe I, et al. 2012. Forecast of low visibility and fog from NCEP: Current
689 status and efforts [J]. Pure Appl. Geophys., 169: 895-909.