

青岛地区海雾分布及大气边界层条件分析

任兆鹏^{1,2}, 李昊倩³, 鞠霞⁴, 王国清⁵

(1. 青岛市气象局, 山东 青岛 266003; 2. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心, 山东 青岛 266003; 3. 自然资源部 北海预报中心, 山东 青岛 266061; 4. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 5. 平度市气象局, 山东 平度 266700)

摘要: 青岛地区海雾多发, 观测表明海雾对沿海地区影响范围不尽相同, 特别是海雾影响内陆的机理尚缺乏研究。本文利用观测资料及数值模式统计了青岛地区 4 月—7 月海雾分布特征, 并对不同影响范围海雾典型个例进行对比分析, 结果表明: 海雾发生日数自沿海向内陆递减。胶州湾沿岸雾日数比黄海沿岸明显减少, 胶州湾东北部的雾日数要少于胶州湾西北部。海雾多发生于高空形势稳定, 低层偏南流场的天气条件下。大气边界层内逆温层的范围大致影响着海雾的分布。只影响沿海的海雾, 地面为偏南风, 风速在 3~8 m/s 之间, 内陆风力减弱不明显。500 m 以下大气边界层内风速切变大。湍流作用使海雾向内陆推进过程中倾斜抬升为低云, 地面雾区减弱。能够影响内陆地区的海雾, 多出现在地面风力较弱的情况之下, 大部分在 1~3 m/s 之间。500 m 以下大气边界层内风速切变小, 大气边界层内湍流强度不强, 使沿海到内陆的逆温层能够始终维持, 沿海海雾在弱南风影响下延伸影响内陆地区。

关键词: 海雾分布; 数值模拟; 大气边界层; 逆温层

中图分类号: P732.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)05-0096-11

DOI: 10.11759/hyxx20200105002

海雾是指在海洋影响下发生在海上、岸滨和岛屿上空的低层大气中, 由于水汽凝结而产生的大量水滴或冰晶使得水平能见度小于 1 km 的灾害性天气^[1]。海雾造成的低能见度对海上人类活动具有严重影响; 海雾登陆沿海地区, 会影响沿海的高速公路和机场等交通设施运行, 造成严重交通事故, 影响人民生活^[2]。

青岛位于黄海之滨, 是我国沿海海雾发生频率最高的地区, 每年 4—7 月发生最多且绝大部分均为平流冷却雾^[3]。海雾的发生发展与环流形势和大气边界层结构有密切的关系^[4], 海雾水平分布和垂向发展也与大气边界层内温度和湿度层结密切相关^[5-6]。在海雾个例中, 雾顶常位于逆温层底部, 雾顶长波辐射和逆温层强度之间存在较强的相互作用^[7]。较浅薄海雾的顶部往往存在强逆温层, 此时雾顶长波辐射对边界层底部的冷却作用明显^[8]。Leipper 分析美国加州沿岸海雾过程指出海雾形成后在偏西风的控制下进入沿岸地区, 此时大气边界层内逆温层底的高度影响着海雾的抬升与消散^[9]。黄海西部海雾垂直结构还具有明显的季节变化, 春季雾层较薄, 夏季较厚, 海雾入侵多集中于这两个季节^[10-11]。

前人对海雾过程的研究多集中在近海及沿海地区, 在日常的业务预报当中, 对于海雾能够影响沿岸的范围程度, 也缺乏统计研究。随着沿岸能见度观测网的建立与完善, 使得研究海雾对内陆影响程度变得可行。本文通过分析观测资料统计青岛海雾分布特征, 并通过典型海雾个例的数值模拟结果分析大气边界层条件对海雾分布范围的影响。

1 资料、方法与模式设置

1.1 资料与方法

本文使用的资料主要有: (1)地面观测数据采用青岛市气象局提供的青岛地区 7 个人工气象观测站

收稿日期: 2020-01-05; 修回日期: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(NSFC41576108); 青岛市气象局青年科研专项(2016qdxq8); 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201801)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41576108; Foundation for junior scientist of Qingdao Meteorological Bureau, No. 2016qdxq8; Science and Technology Collaborative Innovation Fund of Bohai Rim region, No. QYXM201801]

作者简介: 任兆鹏(1983-), 男, 山东青岛人, 工程师, 硕士, 主要从事短期天气预报和海雾研究, 电话: 13026530129, E-mail: renzpeng@163.com

以及 33 个具有能见度观测的自动气象观测站数据,要素包括气温、露点、风向风速、能见度等。(2)探空数据使用青岛市气象局 L 波段探空雷达观测数据,每日 07 时、19 时两次观测,要素包括温度、湿度、气压、风向风速等。(3)天气形势背景场采用美国国家环境预报中心(NCEP)的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 全球再分析资料。

本文通过公式(1)来反演大气水平能见度^[12-13],能见度低于 1 000 m 表示雾区。

$$\text{VIS} = \ln \frac{0.02}{144.7(\rho \cdot q)^{0.88}}, \quad (1)$$

其中 q 为液态水含量(单位: g/kg),海雾模拟中多用云水含量, ρ 为大气密度(单位: g/cm³)。该公式在雾数值模拟研究中经常被使用^[5]。

1.2 模式设置

本文使用中尺度数值模式 WRF(Weather Research and Forecasting)v3.9 对海雾个例进行数值模拟。模式采用两重网格嵌套,中心位置位于(36°N, 123°E)。模式初始场采用美国国家环境预报中心(NCEP)的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 全球再分析资料(NCEP FNL Operational Global Analysis data)。模式其他参数设定见表 1。由于本文将着重分析大气边界层内的层结状况,因此模式边界层方案选择对于黄海海雾过程模拟更有优势的 YSU scheme 方案^[14-16]。

表 1 WRF-ARW 参数设定
Tab. 1 WRF-ARW parameter settings

参数	网格(D01)	网格(D02)
分辨率/km	30	10
格点数	151×151	301×301
中心位置	36°N, 123°E	
垂直层数	35	
微物理过程	Lin et al scheme ^[17]	
长波辐射方案	RRTM scheme ^[18]	
短波辐射方案	Dudhia scheme ^[19]	
边界层方案	YSU scheme ^[20]	
近地层方案	Monin-Obukhov scheme ^[21]	
陆面模式	Thermal diffusion scheme	

2 海雾影响范围特征分析

通过分析青岛市 7 个人工气象观测站(分别位于青岛、崂山、黄岛、胶州、即墨、平度和莱西)1981—2010 年共 30 年地面观测资料,其中将人工观测记录出现雾的天气现象记为一个雾日,得到青岛地区 4 月

—7 月年平均雾日分布(图 1a)。位于沿海的青岛站和黄岛站的海雾出现频率最高,分别超过 30 天和 20 天。随着站点位置向内陆推进,崂山站和胶州站的海雾出现频率逐渐下降。其中胶州站虽然位于胶州湾沿岸,但相比于位于黄海沿岸的青岛站,海雾出现频率有明显的减少,说明胶州湾的独特地形对于海雾的入侵有阻挡作用。最后是位于深入内陆的即墨、平度和莱西站,雾日数明显减少,都在 10 天以下。

自 2010 年以来,青岛地区能见度观测网逐步建立,目前全市具有能见度观测的自动站 35 个,其中还包括 5 个海岛站和 2 个浮标站。由于自动气象站的布设逐年增加,为了保持观测资料的对比性,本文挑选了 30 个能见度自动站 2014—2017 年相对完整的 4 年观测资料进行对比分析,其中将能见度观测值小于 1 km 且持续时间超过 2 小时记为一个雾日。从 2014—2017 年 4—7 月平均雾日分布来看,与常年平均有大致相同的分布规律,海雾日数自沿海向内陆呈明显的递减趋势。青岛近海大公岛附近有雾日数的大值区,超过 40 天。胶州湾沿岸虽然同样沿海,但雾日数均在 20 天以下,比黄海沿岸站点明显的减少。胶州湾西北部的雾日数在 8~20 天,明显要高于胶州湾东北部的 2~10 天。考虑在 4—7 月海雾生成时,青岛沿海的盛行风向多为东南风,因此更容易在胶州湾的西北部形成海雾并深入内陆。而在胶州湾东北部及更偏东的即墨地区雾日最少。此区域位于崂山山脉的西北侧,处在东南气流的背风坡,使得海雾不容易在东南风的影响下到达这一地区。

3 典型海雾过程个例

本文选取青岛站(36.1°N, 120.3°E)和平度站(36.7°N, 119.9°E)作为海雾能够影响沿海和内陆的代表站点,两站点到海岸线距离约为 1 km 和 60 km。根据自动站能见度的观测资料选取两类典型的海雾过程,一类只影响包括青岛站在内的黄海沿岸站点及海岛站,另一类影响区域除沿岸站点外还深入内陆并能够影响到平度站。同时为了反映雾季的整体特征,个例选取的时间在 4—7 月也都有涉及。根据以上原则选取 2014—2017 年 4—7 月共 12 次海雾个例进行试验研究,海雾个例持续时间见表 2。L1—L6 个例为能够影响沿海及内陆的个例, H1—H6 个例为只影响沿海的个例。从海雾发生的时段上来看,所有个例都主要发生在夜间。青岛站的影响时段大致从 17 时开始,持续到次日的上午,最长可持续到中午前后。平度站

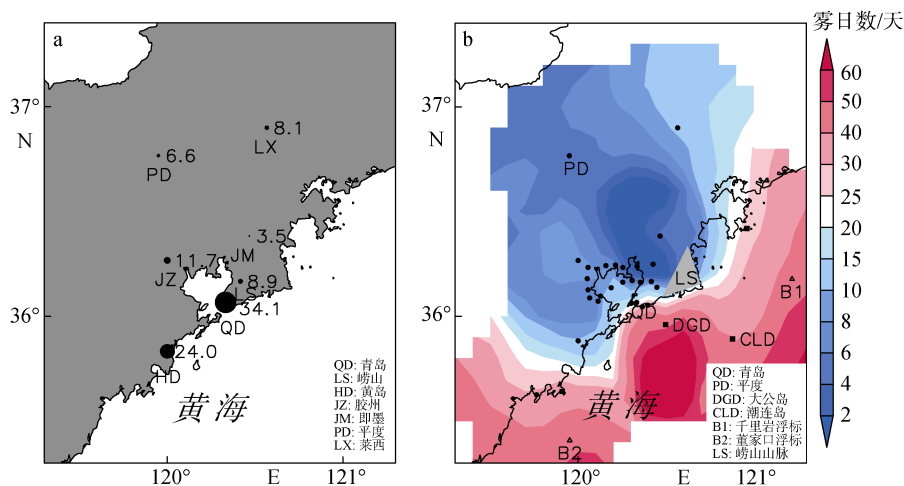


图 1 青岛地区 4 月—7 月平均雾日数及站点分布

Fig. 1 Annual mean fog days from April to July in Qingdao and distribution of observation stations—(a) 1981–2010 (b) 2014–2017

注: 子图 a: 1981—2010 年; b: 2014—2017 年

表 2 海雾过程个例及持续时间

Tab. 2 Dates and durations of sea-fog events

编号	起始日期	青岛	平度
L1	2016.04.08	8 日 17: 50—9 日 10: 40	9 日 05: 04—07: 50
L2	2016.04.12	12 日 23: 30—13 日 07: 40	13 日 04: 50—08: 20
L3	2017.04.06	6 日 17: 10—7 日 12: 00	7 日 0: 00—08: 30
L4	2017.04.07	7 日 17: 10—8 日 09: 30	7 日 23: 40—8 日 07: 00
L5	2017.05.04	4 日 21: 40—5 日 10: 20	5 日 04: 10—06: 30
L6	2017.07.03	3 日 20: 10—4 日 08: 20	4 日 05: 30—06: 20
H1	2016.04.13	13 日 15: 30—14 日 08: 30	无
H2	2015.04.30	30 日 16: 30—1 日 09: 30	无
H3	2015.05.01	1 日 18: 10—2 日 04: 40	无
H4	2016.05.29	29 日 17: 50—30 日 05: 10	无
H5	2016.06.20	20 日 17: 20—21 日 06: 10	无
H6	2016.06.20	21 日 17: 10—22 日 06: 40	无

的影响时段最早从 0 时前后开始,在日出时段结束,影响时段的特点更接近于辐射雾。在这些个例的白天时段,可从可见光卫星云图上清晰分辨海雾的特征,特别是在海区上的分布,表面纹理均匀,边界清晰。只影响近海沿岸的海雾个例海岸线边界清晰,而影响内陆的海雾个例海岸线边界更为模糊,表明海雾已向内陆地区延伸(图略)。

4 天气形势背景

利用 NCEP 再分析资料对海雾个例的天气形势进行简要的分析, 由于海雾过程皆发生于夜间, 因此选取当日 20 时天气形势进行分析, 如图 2 所示。

L1 个例中 850 hPa 处于平直的西风气流, 1 000 hPa 处在黄海高压环流的西部, 青岛沿海及内陆地区均为偏南气流。L2 个例中 850 hPa 处于浅槽控制, 1 000 hPa 大范围的高压环流中心位于西北太平洋及日本, 黄海和东海都已南到东南气流为主。L3 和 L4 个例 850 hPa 位于北部西风槽的底部, 1 000 hPa 高压环流中心位于成山头一带, 青岛沿海在 20 时时还以偏东气流为主。考虑高压在夜间逐渐东移, 青岛沿海会逐渐位于高压后部的偏东南气流之中。L5 和 L6 个例 1 000 hPa 流场上看不到明显的高压环流中心, 但在黄海和东海海域都以南风或东南风为主。利于海雾的形成。

H1 个例中 850 hPa 位于西风槽底部, 1 000 hPa 高压环流中心位于成山头附近, 流场较弱, 青岛沿海以弱的东南风为主。H2 个例中黄海小高压位置偏东偏南, 大致位于朝鲜半岛南部, 青岛沿海位于高压的西北侧, 弱东南气流中。H3 个例中 850 hPa 呈东高西低的位势场分布, 1 000 hPa 黄海和东海有比较强的偏南气流存在。H4 个例 850 hPa 山东为高压脊控制, 1 000 hPa 高压环流中心位于山东半岛东部, 未来东移之后, 青岛沿海也将在高压后部偏南气流中。H5 和 H6 为连续两天的个例, 环流形势基本相同, 1 000 hPa 高压环流中心都位于黄海北部, H6 个例的东南风流场比 H5 有所增大。

通过典型个例的天气形势分析, 我们发现对于 850 hPa 高空形势虽然各有不同, 但相同的是都没有明显的西风槽系统发展, 850 hPa 流场都处在一个相对稳定的环流条件中。而在 1 000 hPa 大部分个例都位于黄海小高压后部的东南气流当中, 其他个例地面流场则为东高西低的气压分布下, 形成了比较明显的偏南气流。因此偏南风对于的海雾天气的形成具有重要的作用。而对于影响内陆和只影响沿海这两种海雾天气的天气形势差异, 在以上的分析当中并不明显。因此下文将对大气边界层内的层结结构进行分析模拟, 找出两类不同影响范围海雾过程大气边界层结构的差异。

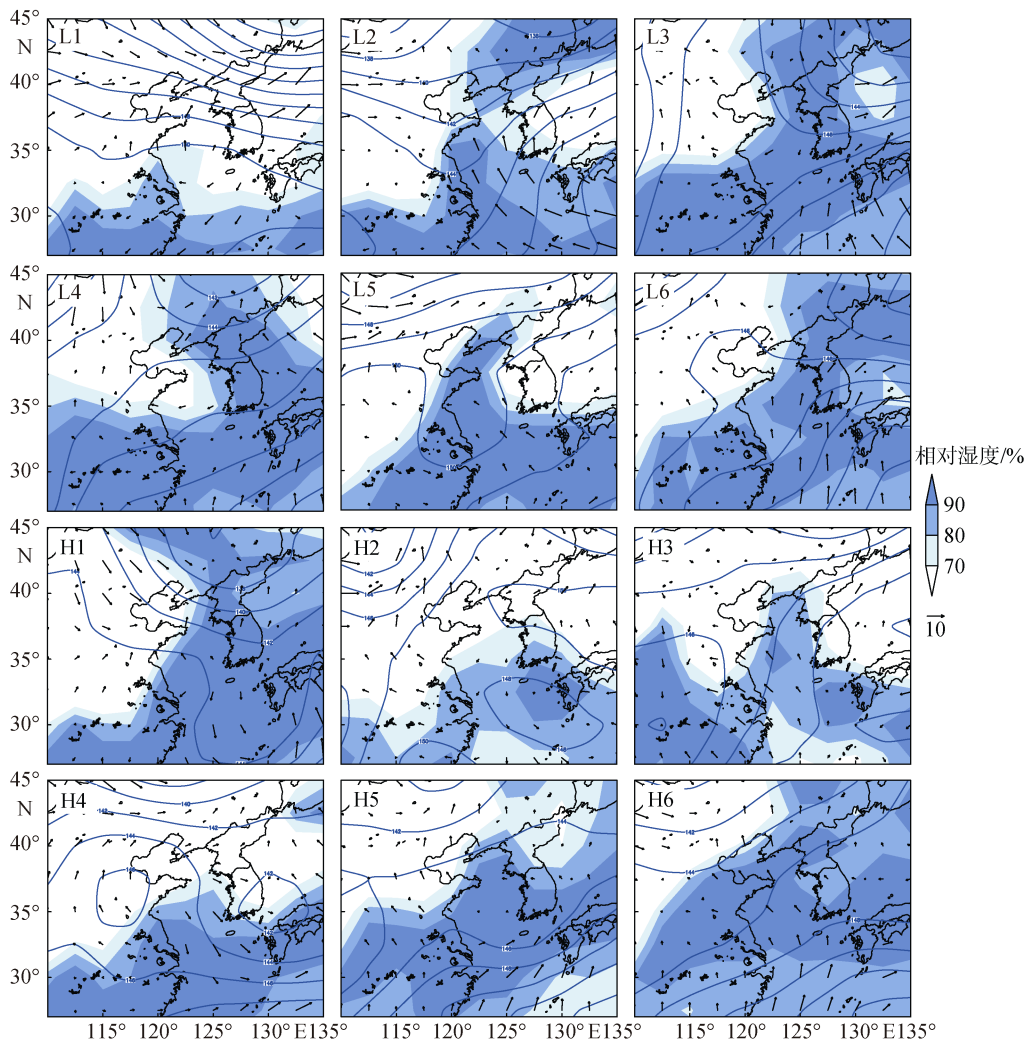


图2 海雾个例天气形势图

Fig. 2 Synoptic charts of fog events [contour: geopotential height at 850 hPa, unit: dagpm (1 dagpm=98 m²/s²); shaded areas: relative humidity at 1 000 hPa, unit: %; arrows: wind at 1 000 hPa, unit: m/s]

注: 等值线: 850 hPa 位势高度场, 单位: 位势十米(1 dagpm=98 m²/s²); 填色: 1 000 hPa 相对湿度场, 单位: %; 箭头: 1 000 hPa 风场, 单位: m/s)

5 数值试验

5.1 海雾个例模拟及检验

利用中尺度数值模式 WRF 对 12 次海雾过程个例进行数值模拟。云水混合比可作为能见度反演的主要参数之一^[12], 从公式反演得到模式最底层大气的云水混合比高于 0.1 g/kg 的分布可较好表示地面及海面的雾区(能见度小于 1 km)范围。从模拟结果可以看出(图 3), L1—L6 个例较好地模拟出了海雾在夜间时段影响青岛内陆的情况, 雾区的范围可延伸

至平度地区。而 H1—H6 个例则较好地反映出了只影响青岛沿海地区的情况。将青岛站 L 波段探空雷达数据与模式结果相对比(图 4), 可以看出在海雾发生当日的 19 时, 1 000 m 高度以下大气边界层内的温度场和湿度场模式结果与实况探空的垂直廓线较符合, 特别是在逆温层的高度和湿层的高度与实况观测基本一致。因此 WRF 模式对于选取的海雾个例模拟能力较好。因此接下来可以利用模式输出的时空高分辨率结果, 对于海雾发生时的大气边界层结构进行详细分析, 研究造成海雾影响范围差异的有价值信息。

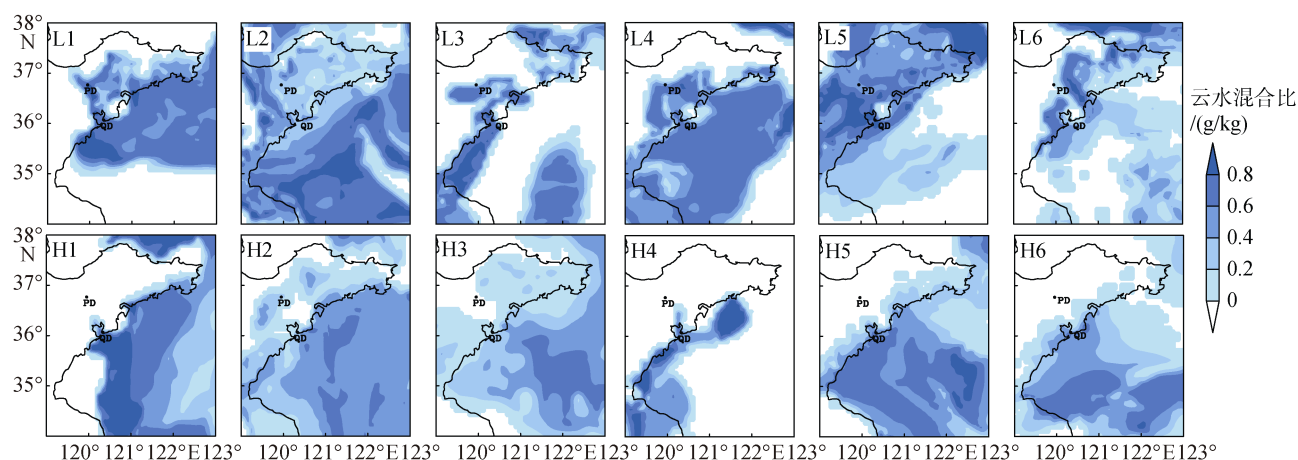


图 3 模式最底层大气中云水混合比的分布(单位: g/kg)

Fig. 3 Simulated cloud water mixing ratio (g/kg) at the first level

5.2 大气边界层结构分析

青岛站和平度站的分别位于(36.1°N, 120.3°E)和(36.7°N, 119.9°E)。本文在分析大气边界层内垂直结构时, 在青岛站与平度站之间作垂直剖面, 经度选取 119.9°E—120.3°E 的平均值, 纬度沿 35°N—37°N。

温度层结方面, 前人的研究已经表明, 大气边界层内的逆温层对于海雾的形成有着至关重要的作用^[22]。在海雾影响内陆的个例中, L1—L6 个例从平度至青岛再向南一直到青岛近海均存在明显的逆温层(图 5)。逆温层顶的高度在 300~400 m。逆温层强度在 3℃~8℃, 且有随季节的变化的特点, L1—L4 个例发生在 4 月份, 逆温强度普遍在 6℃~8℃。而 L5—L6 个例发生在 5 月和 7 月, 逆温强度逐渐变小, 在 3℃~5℃。前人研究表明, 4 月的强逆温层和 7 月的较弱逆温层与大气环流条件有关^[23]; 本研究认为主要原因为春季到夏季演变过程中, 地面温度升高幅度较快, 而高层温度变化幅度相对地面较小, 因此使

逆温层的逆温强度有所减弱。

在只影响沿海的个例中, 逆温层呈现不同的特点。在 H1 个例中, 近海到青岛站附近, 逆温层明显, 逆温强度在 10℃, 而在北部的平度逆温层强度明显的减弱, 只有 2℃。H2 个例, 青岛及近海逆温层并没有贴地, 而在约 100~200 m 的高度, 相应的云水混合比高值区也有抬升, 地面云水混合比仍在 0.2 g/kg 以上。平度附近逆温层几乎消失, 地面附近云水混合比也较低。H3 个例整个剖面都没有明显的逆温层存在, 但平度附近地面气温更高, 温度垂直递减率更大, 地面附近对应云水混合比的低值区。H4 个例与 H1 个例相似, 整个剖面都有逆温层存在, 但青岛附近的逆温强度比平度附近要强。H5 和 H6 个例在青岛及近海有显著逆温层存在, 而向北至平度附近时逆温层逐渐减弱消失。总结来看当内陆地区逆温层消失时, 海雾将不会向内陆发展, 且雾区有明显的分界线。当内陆地区逆温层强度明显减弱时, 海雾强度也会明显减弱, 甚至消失。虽然有如 H3 个例没有逆

温层存在情况,但我们通过对比图 3 云水混合比分布图上, H3 个例雾区呈 SE-NW 向分布,当沿 SE-NW 作剖面时,也得到了如前的结论(图略)。H 型个例中,云水混合比高值区在离开地面一定高度,说明有低

云存在。反映了海上有雾,到陆地上,雾层抬升为低云。前人曾讨论水汽输送等对海雾入侵内陆程度的影响^[24],本文的研究进一步指出,这种现象与大气边界层垂直结构,如逆温层强度等,有密切关系。

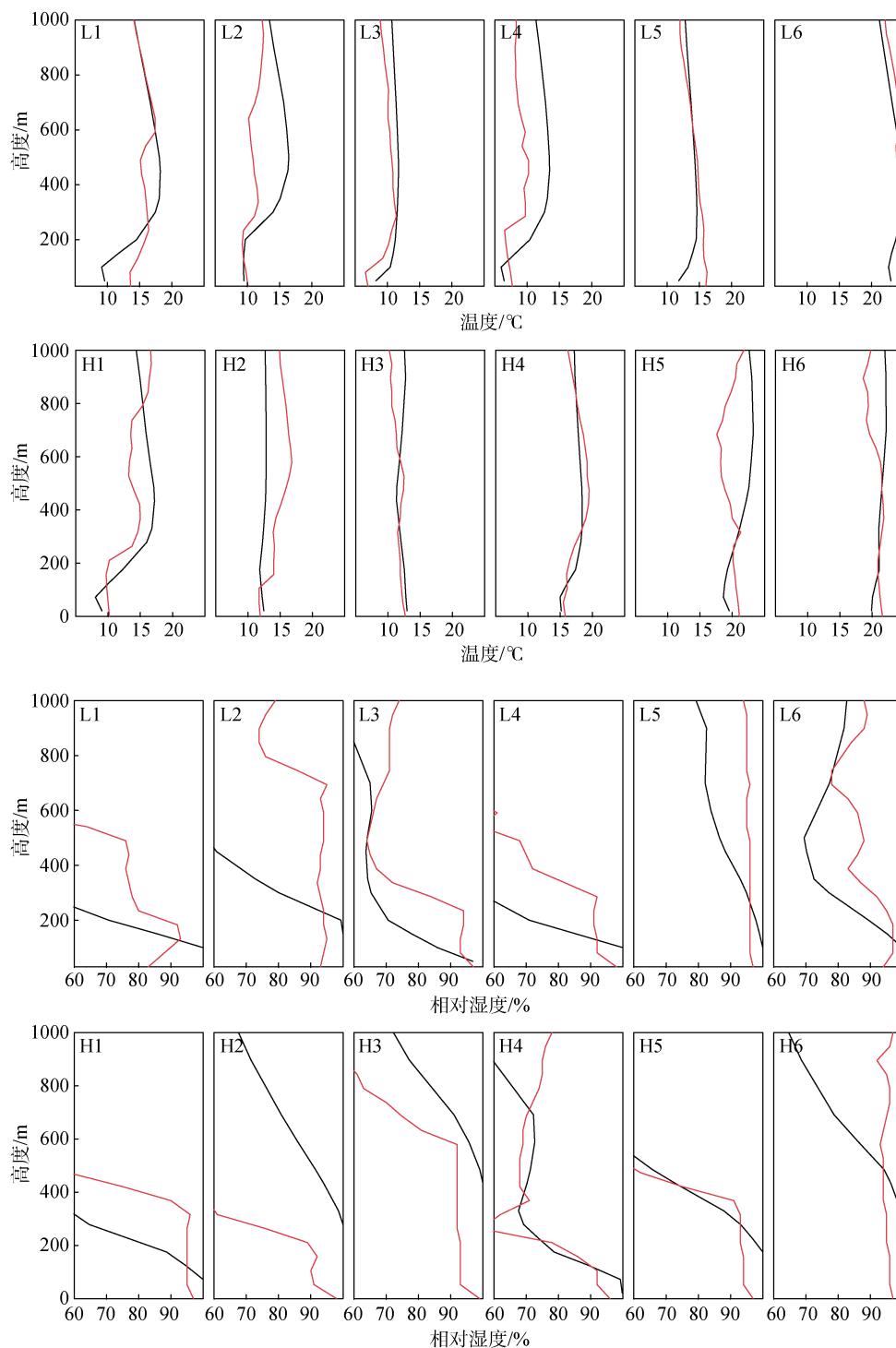


图 4 青岛站探空(红色)和模式(黑色)廓线

Fig. 4 Profiles of sounding data in Qingdao (red) and simulation results (black) (temperature, unit: °C; relative humidity, unit: %)

注: 温度: 单位°C; 相对湿度: 单位%

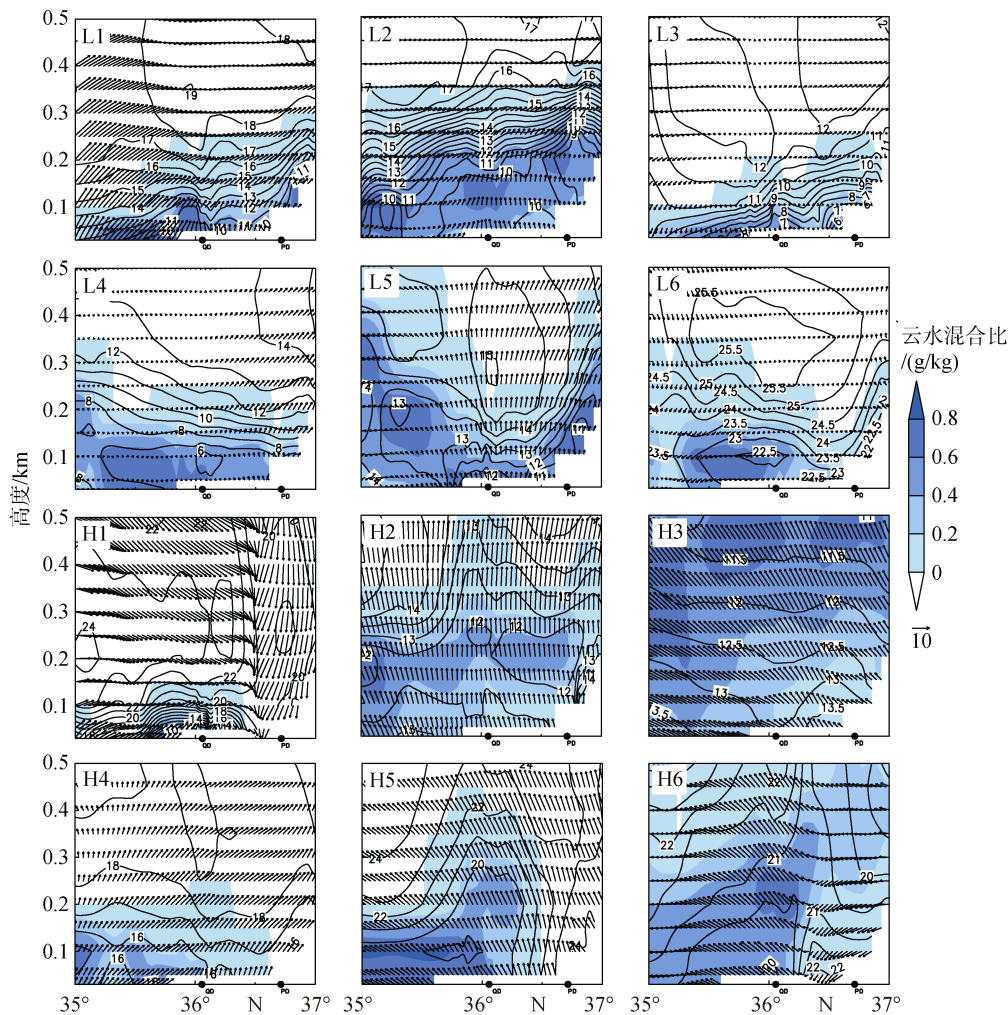


图5 模式大气边界层垂直剖面

Fig. 5 Simulated vertical profiles (contour: temperature, unit: $^{\circ}\text{C}$; shaded area: cloud water mixing ratio, unit: g/kg ; arrows: horizontal wind, unit: m/s . X-axis mark: latitude of Qingdao and Pingdu stations)

注: 等值线: 温度场, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 填色: 云水混合比, 单位: g/kg ; 箭头: 水平风场, 单位: m/s 。横坐标圆点为青岛站和平度站的纬度

由于4月—7月青岛沿海出现的海雾几乎都属于平流雾, 因此大气边界层内的风场的分布特征也是非常重要的影响因素。从上文对所有个例的天气形势分析得到, 在1 000 hPa风场上, 风向几乎都为偏南风, 偏南到东南风最多。按上文方法选取同样的剖面分析得到青岛到平度大气边界层内的风场垂直分布图(图6), 可以看到, H1个例中青岛及近海海域近地面以西南风为主, 风速在4~8 m/s, 内陆延伸至平度转为偏北风, 200 m高度以上均转为偏北风。H2个例近地面为偏南风, 风速5~7 m/s, 随高度逐渐增加。H3个例近地面南到东南风, 风速青岛到沿海6~8 m/s, 内陆4~6 m/s, 随高度逐渐增加。H4个例近地面南到西南风为主, 风速3.5~5 m/s, 200 m高度附近有6.5 m/s的风速中心。H5个例近地面东南风, 风速4.5~5.5 m/s,

400 m高度有9.5 m/s的风速中心。H6个例青岛到海上近地面为东南风, 风速4~7 m/s, 300 m高度处有8.5 m/s风速中心, 内陆各层均转为偏北风。分析以上个例发现, 在只影响沿海的个例中, 青岛及近海底层均为偏南风, 风速普遍在3~8 m/s。内陆地区风力稍弱在3~6 m/s, 或直接转为偏北风, 不利海雾推进。在200~400 m的高度多存在一支极值在6~10 m/s的风速中心, 自沿海向内陆高度逐渐升高。在500 m高度以下的大气边界层内的垂直风速切变可以达到3~7 m/s, 较大的垂直风切变使边界层的湍流增强, 加之风速中心的高度向内陆升高, 使海雾在向内陆推进过程中逐渐抬升为低云。

而影响内陆的个例中, L1个例近地面南到西南风, 风速沿海在4~7 m/s, 内陆2~4 m/s。L2个例近地

面风向南风, 风速 1~4 m/s。L3 和 L4 个例近地面风速在 0.5~2 m/s, 由于风力较弱, 地面风向比较杂乱, 南北风并存。L5 个例近地面南风为主, 风速 1.5~2 m/s。L6 个例近地面为偏东风, 风速在 1~3.5 m/s。通过对比发现在影响内陆的海雾个例中, 近地面的风速相比沿海海雾个例明显的偏小, 大部分在 1~3 m/s 之间。也就是说当海雾影响内陆地区时, 并不是我们通常所预想由于较大的偏南风使沿海的海雾平流到内陆, 而是大气边界层底层南风风力整体要偏弱。在 200~400 m 高度同样有风速中心存在, 但最大风速只有 3~6 m/s, 同时 500 m 以下大气边界层内垂直风速切变只有 1~4 m/s, 明显的小于只影响沿海的个例。大气边界层更加稳定, 使海雾始终能维持在近地面层并缓慢向内陆推进。

通过以上分析得出, 海雾的影响范围, 与大气边界层中的层结结构密切相关。大气边界层的温度层结即逆温层的存在最为重要, 直接决定海雾影响的范围。当内陆逆温层减弱甚至消失时, 海雾不再向内陆继续发展。逆温层顶高度大多在 300~400 m, 逆温层强度有季节差异, 春季逆温强度较强, 夏季较弱。

青岛近海海雾多为平流冷却雾, 在偏南风的控制下, 来自南方的暖湿空气, 平流到黄海西北部的冷海面上冷却形成海雾。在统计的海雾个例中, 只影响沿海地区的个例, 地面风场偏南风为主, 风速在 3~8 m/s 之间。内陆地区风场有两种情况, 一是转为偏北风, 导致逆温层消失, 海雾消散。二是同样是偏南风, 风力在 3~6 m/s, 这种情况下海雾向内陆延伸

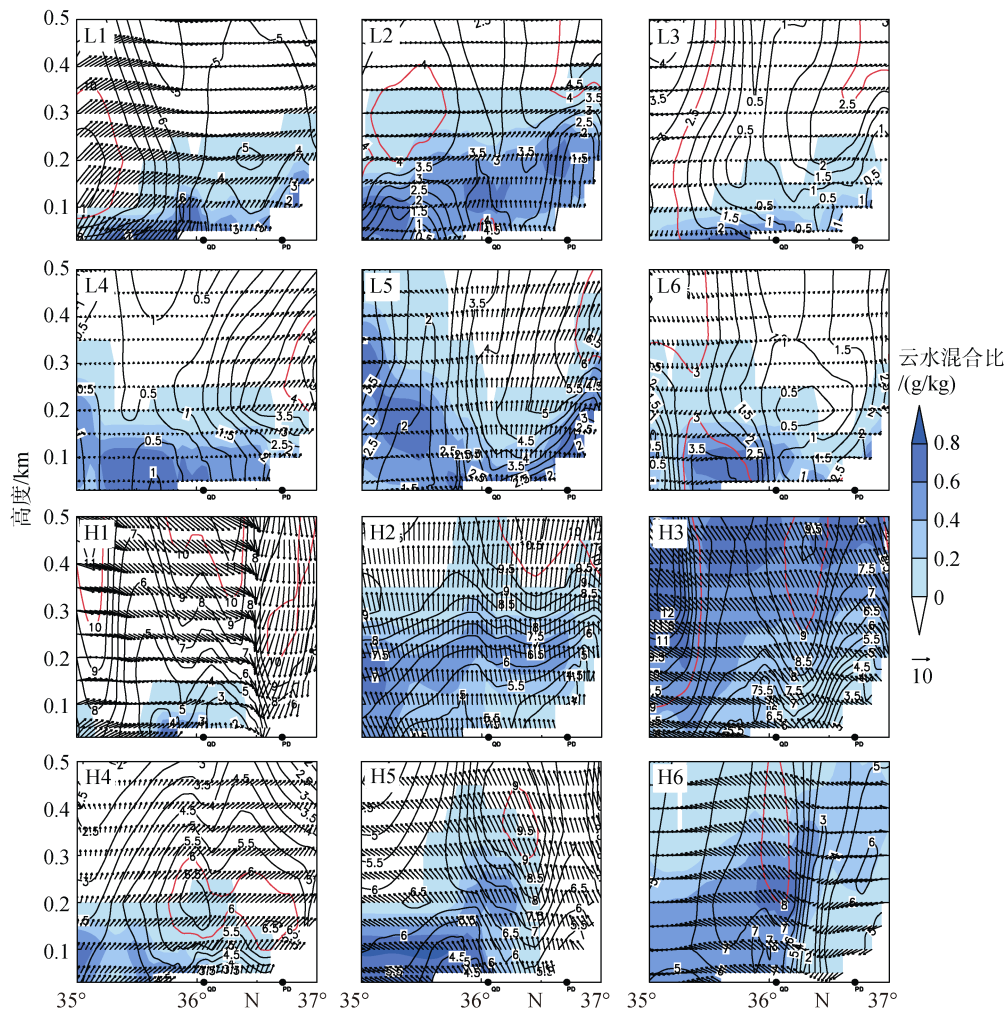


图 6 模式大气边界层垂直剖面

Fig. 6 Simulated vertical profiles (contour: wind speed, unit: °C; shaded area: cloud water mixing ratio, unit: g/kg; arrows: horizontal wind, unit: m/s. X-axis mark: latitude of Qingdao and Pingdu station)

注: 等值线: 风速, 单位: °C; 填色: 云水混合比, 单位: g/kg; 箭头: 水平风场, 单位: m/s。横坐标圆点为青岛站和平度站的纬度

过程中,由于风速较大,近地面湍流逐渐增强,逆温层强度减弱或是抬升,使雾层相应抬升。从垂直剖面来看雾区向内陆延伸过程中发生倾斜抬升。使地面附近水汽减少,雾逐渐消散。而能影响内陆的海雾个例,地面风场一般都以南风为主,沿海地区风力在 3~7 m/s,内陆风力在 1~4 m/s。内陆风力较弱,大气边界层内湍流强度不强,使逆温层能够始终维持,沿海海雾延伸影响内陆地区。

6 结论

本文利用青岛地面观测资料、L 波段雷达探空资料、WRF 模式模拟结果等,分析了青岛 4 月—7 月海雾的分布特征及不同影响范围海雾的形成原因。主要结论如下:

(1) 4 月—7 月海雾发生日数自沿海向内陆呈明显的递减趋势。近海大公岛附近雾日数最多。胶州湾沿岸雾日数比黄海沿岸明显减少,受崂山山脉的阻挡作用,胶州湾东北部的雾日数要少于胶州湾西北部。

(2) 在只影响沿海和能够影响内陆的两类海雾过程中,850 hPa 高空形势虽然各有不同,但相同的是都没有明显的西风带槽脊系统发展,均处在一个相对稳定的环流条件中。而在 1 000 hPa 都有比较明显的偏南风。

(3) 大气边界层内逆温层的范围影响着海雾的分布。当内陆地区逆温层消失时,海雾将不会向内陆发展。当内陆地区逆温层强度明显减弱时,海雾强度也会明显减弱,甚至消失。对于只影响沿海的海雾,青岛及近海近地面为偏南风,风速在 3~8 m/s 之间,内陆风力减弱不明显。在 200~400 m 高度存在风速中心,500 m 以下大气边界层内风速切变大,湍流作用使内陆逆温层减弱或破坏,海雾向内陆推进过程中倾斜抬升成为低云,地面雾区减弱消散。此外,当内陆风向转为偏北风时雾区整层消散。当海雾能够影响内陆地区时,多出现在地面风力较弱的情况之下,大部分在 1~3 m/s 之间。500 m 以下大气边界层内风速切变小,大气边界层内湍流作用不强,使沿海到内陆的逆温层能够始终维持,沿海海雾在弱南风影响下延伸影响内陆地区。

参考文献:

[1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983: 352.
Wang Binhua. Sea Fog[M]. Beijing: China Ocean Press,

1983: 352.
[2] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(3): 359-366.
Zhang Suping, Bao Xianwen. The main advances in sea fog research in China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(3): 359-366.
[3] 周发琇, 王鑫, 鲍献文. 黄海春季海雾形成的气候特征[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 28-37.
Zhou Faxiu, Wang Xin, Bao Xianwen. Climatic characteristics of sea fog formation of the Huanghai Sea in spring[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(3): 28-37.
[4] 王鑫, 黄菲, 周发琇. 黄海沿海夏季海雾形成的气候特征[J]. 海洋学报, 2006, 28(1): 26-34.
Wang Xin, Huang Fei, Zhou Faxiu. Climatic characteristics of sea fog formation of the Huanghai Sea in summer[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(1): 26-34.
[5] Gao S H, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(1): 65-81.
[6] 张苏平, 刘飞, 孔扬. 一次春季黄海海雾和东海层云关系的研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(2): 341-352.
Zhang Suping, Liu Fei, Kong Yang. Remote relationship in origination of sea fog in East China Sea to the stratus in Yellow Sea in spring[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(2): 341-352.
[7] Lewis J. Sea fog off the California coast: Viewed in the context of transient weather systems[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D15): 4457-4473.
[8] Zhang S P, Xie S P, Liu Q Y, et al. Seasonal Variations of Yellow Sea Fog: Observations and Mechanisms[J]. Journal of Climate, 2009, 22(24): 6758-6772.
[9] Leipper D F. Fog on the United-States west-coast-a review[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1994, 75(2): 229-240.
[10] Zhang S, Li M, Meng X, et al. A Comparison Study Between Spring and Summer Fogs in the Yellow Sea: Observations and Mechanisms[J]. Pure and Applied Geophysics, 2012, 169(5-6): 1001-1017.
[11] 涂静, 张苏平, 程相坤, 等. 黄东海大气边界层高度时空变化特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 7-18.
Tu Jing, Zhang Suping, Cheng Xiangkun, et al. Temporal and spatial variation of atmospheric boundary layer height (ABLH) over the Yellow-East China Sea[J]. Periodical of ocean university of China, 2012, 42(4): 7-18.
[12] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models[J]. J. Climate Appl. Meteor., 1984, 23(1): 34-41.
[13] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, Mesobeta-Scale Model Simulations of Cloud Ceiling and Visibility

- for an East Coast Winter Precipitation Event[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(4): 385-404.
- [14] 任兆鹏. 黄海春季和夏季海雾过程的观测分析与数值试验[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Ren Zhaopeng. The observational and numerical study of sea fog events over the Yellow Sea during spring and summer[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [15] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾 WRF 参数化方案敏感性研究[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 312-320.
Lu Xue, Gao Shanhong, Rao Lijuan, et al. Sensitivity study of WRF parameterization schemes for the spring sea fog in the Yellow Sea[J]. Journal of applied meteorological science, 2014, 25(3): 312-320.
- [16] 饶莉娟. YSU 与 MYNN 边界层方案的黄海海雾模拟效果比较[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Rao Lijuan. Comparison of the effect of YSU and MYNN PBL schemes on the modeling of the Yellow Sea fogs[D]. Ocean University of China, 2014.
- [17] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J Climate Appl Meteor, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [18] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 16663.
- [19] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J Atmos Sci 1989, 46(20): 3077-3107.
- [20] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318.
- [21] Zhang D, Anthes R A. A high-resolution model of the planetary boundary layer—Sensitivity Tests and Comparisons with SESAME-79 Data[J]. Journal of Applied Meteorology, 1982, 21(11): 1594-1609.
- [22] 张苏平, 任兆鹏. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响——观测与数值试验[J]. 气象学报, 2010, 68(4): 439-449.
Zhang Suping, Ren Zhaopeng. The influence of the thermal effect of underlying surface on the spring sea fog over the Yellow Sea: Observations and numerical simulations[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(4): 439-449.
- [23] Zhang Suping, Lewis M. Chapter 6, Synoptic Processes, Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations, Modeling, and Forecasting[M]//Koračin D, Dorman C E. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 537. DOI: 10.1007/978-3-319-45229-6_6.
- [24] 孙健翔, 黄辉军, 张苏平, 等. 海雾对沿海地区的影响程度初探——2008 年春季两次黄海海雾过程分析[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 483-497.
Sun Jianxiang, Huang Huijun, Zhang Suping, et al. Impact of sea fog on coastal area: analysis of two cases over the Yellow Sea in spring 2008[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(3): 483-497.

Distribution of sea fog and analysis of boundary layer conditions in Qingdao

REN Zhao-peng^{1, 2}, LI Hao-qian³, JU Xia⁴, WANG Guo-qing⁵

(1. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 3. North China Sea Marine Forecasting Center, MNR, Qingdao 266061, China; 4. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 5. Pingdu Meteorological Bureau, Pingdu 266700, China)

Received: Jan. 5, 2020

Key words: distribution of sea fog; numerical simulation; planetary boundary layer; inversion layer

Abstract: Sea fog often occurs in the Qingdao area. The observation shows that the influences of sea fog on coastal areas are not the same, and studies on the mechanism of sea fog on inland areas are still lacking. Based on observation data and numerical simulation, the distribution characteristics of sea fog in Qingdao from April to July are analyzed, and typical sea fog cases with different influence ranges are compared. The results show that the sea fog days decrease from the coastal to inland areas. The foggy days along the coast of the Jiaozhou Bay are fewer than those along the Yellow Sea, and the foggy days in the northeast of the Jiaozhou Bay are fewer than those in the northwest. The sea fog mostly occurs under weather conditions possessing high-level winds and low-level southerly winds. The range of the inversion layer in the planetary boundary layer controls the sea fog distribution. For the sea fog cases that only affect the coast, the wind direction is southerly and between 3 and 8 m/s, and the inland wind is not significantly weakened. The wind shear is strong in the boundary layer below 500 m. Turbulence makes the sea fog incline and rise to low clouds in the process of advancing inland, and the fog on the ground is weakened. The sea fog that can affect the inland area mostly occurs in the case of weak ground wind, most of which is between 1 and 3 m/s. The wind shear in the boundary layer below 500 m is weak, and the turbulence in the atmospheric boundary layer is not strong, so that the inversion layer from the coastal to inland areas can be maintained at all times, and the coastal sea fog extends to affect the inland area under the influence of weak southerly winds.

(本文编辑: 丛培秀)