

梁钊明, 高守亭, 王东海, 等. 2013. 城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响的一次数值试验 [J]. 大气科学, 37 (5): 1013–1024, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12153. Liang Zhaoming, Gao Shouting, Wang Donghai, et al. 2013. A numerical study of the urban underlying surface effect on the characteristics of a sea breeze front in the Bohai Bay region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1013–1024.

城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响 的一次数值试验

梁钊明¹ 高守亭² 王东海¹ 王彦³

¹ 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

² 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

³ 天津市气象台, 天津 300074

摘 要 海风锋与沿海强对流天气密切相关, 而城市化发展对沿海地区下垫面的改变会对海风锋特征产生影响。鉴于此, 本文利用耦合了新一代城市物理方案 UCP-BEM (Urban Canopy Parameterization-Building Energy Model) 的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式开展数值试验分析了城市下垫面对渤海湾海风锋特征的影响。结果显示: 城市下垫面高粗糙度对低层海风风速的明显削弱造成海风锋往内陆推进距离稍减, 低层辐合和上升运动减弱; 城市下垫面较大的向上感热通量和较小的向上水汽通量以及高粗糙度对海风的削弱的共同作用造成冷湿海风对低层大气的降温和增湿幅度减弱; 高粗糙度的城市下垫面对海风环流的摩擦力效应使得海风得到抬升, 这导致了冷湿海风对低层大气的降温和增湿的垂直范围得到提升; 受这些结果影响, 海风锋背后低层有效位能减小, 但垂直分布范围扩大, 从而造成对流抑制高值区抬升, 同时海风锋背后的静力不稳定区变厚, 其上面的动力不稳定区则变薄, 但不稳定区总厚度基本不变。

关键词 城市下垫面 海风锋 数值试验

文章编号 1006-9895(2013)05-1013-12

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12153

A Numerical Study of the Urban Underlying Surface Effect on the Characteristics of a Sea Breeze Front in the Bohai Bay Region

LIANG Zhaoming¹, GAO Shouting², WANG Donghai¹, and WANG Yan³

¹ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074

Abstract Sea breeze fronts are closely related to the severe convective weather that occurs in coastal regions. Changes in the underlying surface of the coastal region, caused by urbanization, influence the characteristics of the sea breeze front. We applied the WRF (Weather Research and Forecasting) model, coupled with a new generation urban physics scheme, the UCP-BEM (Urban Canopy Parameterization-Building Energy model), to study the effects of urban underlying surfaces on sea breeze front characteristics in the Bohai Bay region. The results showed that the low-level sea breeze was weakened noticeably because of the roughness of the urban underlying surface, leading to decreases in low-level convergence, upward motion, and the inland distance of the sea breeze front. The combination of larger upward sensible heat flux, smaller upward moisture flux, and weaker sea breeze, caused by the thermal and dynamic properties of the

收稿日期 2012-09-15, 2013-02-05 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41075043, 国家科技支撑计划 2008BAC37B01, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306009-2

作者简介 梁钊明, 男, 1984 年出生, 助理研究员, 主要从事中小尺度气象研究。E-mail: liangzm@cma.gov.cn

urban underlying surface, inhibited the cooling and moistening of the low-level atmosphere from the relatively cool and moist sea breeze. The frictional force effect of the urban underlying surface on sea breeze circulation resulted in the lifting of the sea breeze, expanding the vertical atmospheric cooling and moistening range. The available convective potential energy behind the sea breeze front decreased correspondingly, but its vertical distribution expanded, leading to the uplifting of the convective inhibition center. Moreover, the static instability zone thickened while the dynamic instability zone above it thinned, but the thickness of the whole instability zone remained constant.

Keywords Urban underlying surface, Sea breeze front, Numerical experiment

1 引言

沿海地区的有利地理位置和发展条件使得它往往成为城市化发展最快的地方。20 世纪 80 年代以来,我国沿海地区经历了城市化的快速发展,三大城市群京津冀、长江三角洲和珠江三角洲地区均濒临海洋。城市化的发展使得沿海地区的下垫面和近地面环境发生很大的变化,其中城市下垫面(楼房和道路等)的热力特性(热容量、反照率和发射率等)和低绿化率造成的相对少的水汽来源改变了地表与大气之间的感热和水汽通量,而城市下垫面的动力特性(高粗糙度)则使得近地面风速和湍流特征等发生明显改变。另外,城市环境造成的热量平衡,如楼房之间的长波的吸收和发射以及短波的吸收和反射、楼房对太阳光的遮挡、楼房和道路造成的湍流对热量的输送、楼内外的热量交换等,会给近地面的温湿分布状况有很大的影响。海风是发生在沿海地区的浅薄的边界层气流,因此,当海风前沿的海风锋往陆地推进过程中途经城市下垫面时,其热力特性和动力特性将会受到影响。同时,沿海的城市热岛效应会改变海陆的热力差异程度,从而使得海风的强度发生变化,这些变化均可能对海风锋的特征产生影响,而海风锋特征的变化将进一步影响到海风锋对强对流天气的作用。鉴于此,城市下垫面对海风锋特征的影响值得探讨。一些气象学者对城市下垫面对海陆风环流的影响进行过分析。苗曼倩和唐有华(1998)用三维中尺度模式研究了长江三角洲夏季海陆风与城市热岛环流的相互作用,结果显示白天东海海风和太湖湖风与上海市热岛环流相互增强,夜间则相反。Kusaka and Kimura (2000)研究表明城市发展和下垫面改变使得海风锋抵达内陆所需的时间增加,同时指出由于下垫面的改变造成的边界层加热与海风锋相互作用的变化对城市热岛的强度有影响。陆希和寿绍文(2009)利用中尺度数值模式 MM5 对珠三角地区进行的城市化敏感性试验发现城市化对

珠三角地区海陆风的强度和方向有很大影响,特别是中午增强的海风使得珠三角东岸的低层辐合加强。文伟俊等(2009)运用 WRF 模式对 2006 年 8 月 1~2 日的海陆风过程进行的城市化实验结果表明城市热岛效应加强了海风的发展。以上研究主要集中在城市下垫面对海风的强度以及近地面气温的影响方面进行了分析,并没有对海风锋背后不稳定能量以及水汽进行探讨。另外,随着近几年中尺度模式中城市物理方案的完善,模式对城市环境的热量平衡以及动力特征的描述有了很大的进步。本文利用耦合了新一代城市物理方案 UCP-BEM (Urban Canopy Parameterization-Building Energy Model) 的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式开展数值试验探讨城市下垫面对渤海湾海风锋特征的影响。

2 城市物理和数值试验方案

UCP-BEM (Urban Canopy Parameterization-Building Energy Model) 是新一代的城市物理方案,它主要包括了两部分,一个部分是城市冠层参数化 (Urban Canopy Parameterization, UCP) (Martilli et al., 2002), 另一部分则为室内能量模式 (Building Energy Model, BEM) (Salamanca et al., 2010)。城市冠层参数化把城市冠层垂直分离为多层来进行物理描述 (Chen et al., 2011, figure 2), 它考虑了城市冠层内楼房墙壁、楼顶和道路对动量(拖曳强迫方法)、湍流动能 (TKE) 和位温的影响,同时墙壁和道路的辐射过程考虑了短波辐射的被反射、遮挡和拦截的过程以及街道冠层里的长波辐射过程。室内能量模式则主要考虑了楼房内的人为热量的排放以及楼房内外的热量和水汽的交换过程 (Chen et al., 2011)。另外,UCP-BEM 对城市环境模拟的合理性已经通过巴塞尔边界层观测实验数据得到验证 (Chen et al., 2011)。可见,UCP-BEM 对复杂的城市环境物理过程有比较全面和合理的描述,适合在数值试验中选为城市物理方案。

发生在 2009 年 9 月 26 日午后（北京时，下同）渤海湾地区的海风锋个例被采用为数值试验的个例，渤海湾地区则为数值试验区域的中心。数值试验采用四层嵌套区域（图 1a），水平格点数从外层到里层分别为 180×180 ， 268×250 ， 364×337 和 244×190 ，对应的格距为 27 km，9 km，3 km 和 1 km，垂直层次均为 62 层，其中 2 km 以下约有 15 层。美国国家环境预报中心（NCEP）的 $1^\circ\times1^\circ$ 的分析资料（Kalnay et al., 1996）用来生成数值试验的初始条件和侧边界条件，其中侧边界条件的时间间隔为 6 小时，具体的生成方法可以参考 Skamarock

et al.（2008）的技术说明。美国国家环境预报中心 0.5° 分辨率的海温资料（<ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/sst> [2012-11-12]）则用来更新底边界（包括初始条件和侧边界条件的底边界）海洋区域的海温。在一致的初始条件和边界条件下，我们运用 WRF（Weather Research and Forecasting）模式进行两个数值试验，其中一个（下文简称为 Exp URB）存在城市下垫面，并耦合了 UCP-BEM 城市物理方案，城市区域设置为高强度城市类型（其主要参数设置见表 1，其他参数设置参考 WRF 模式（3.3 版本）中的 URBPARM.TBL 文件），另一个（下文简

表 1 Exp URB 数值试验中城市环境的主要参数设置
Table 1 Urban environment parameters used in Exp URB

绿化率	设备热量 排放峰值	街宽 （楼宽）	热容量	反射率	热传导	各楼高所占百分比			
						15 m	20 m	25 m	30 m
0	36 W/m^2	20 m	$10^6\text{ J m}^{-3}\text{ K}^{-1}$ （楼顶、墙壁）	20%（楼顶、墙壁）	$0.67\text{ J m}^{-3}\text{ s}^{-1}\text{ K}^{-1}$ （楼顶、墙壁）	10%	25%	40%	25%
			$1.4\times10^6\text{ J m}^{-3}\text{ K}^{-1}$ （道路）	20%（道路）	$0.4004\text{ J m}^{-3}\text{ s}^{-1}\text{ K}^{-1}$ （道路）				

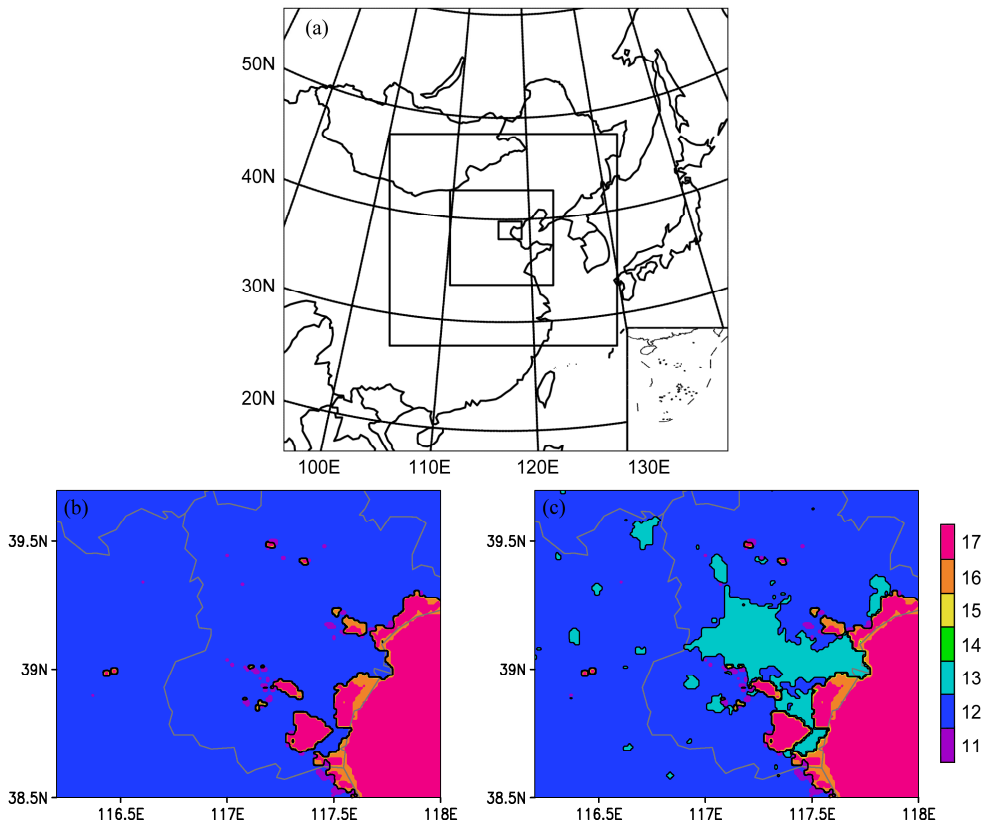


图 1 （a）数值试验采用的四层嵌套区域（从外到里为粗网格区域到细网格区域）；（b）数值试验 Exp NURB 和（c）数值试验 Exp URB 的土地利用类型分布（色标值 13 和 12 分别为城市和乡村，色标值 11、14、15、16、17 分别代表永久性湿地、自然植被、雪地、荒芜和水体等）
Fig. 1 (a) Four nesting domains used in the numerical experiments (grid spacing decreases from outside to inside); (b, c) the distributions of land uses types in (b) Exp NURB and (c) Exp URB (Colors denoting 13 and 12 represent urban and rural land uses, while those denoting 11 and 14 to 17 represent permanent wetland, natural vegetation mosaic, snow, barren, and water land uses)

称为 Exp NURB) 则把城市下垫面修改为乡村下垫面。图 1b 和 1c 为这两个数值试验的下垫面的土地利用类型分布。数值试验积分的初始时间为 2009 年 9 月 26 日 08 时, 结束时间为 2009 年 9 月 26 日 20 时。数值试验采用的物理方案见表 2。本文将通过对比这两个数值试验的结果来分析城市下垫面对渤海湾海风锋特征的影响。

3 数值试验结果对比分析

3.1 温湿场

从图 2 可以看出, 数值试验 Exp NURB 和 Exp

表 2 数值试验 (Exp NURB 和 Exp URB) 采用的物理方案

Table 2 Physics schemes adopted in Exp NURB and Exp URB

物理方案	短波	长波	微物	陆面	边界	城市物理	
	辐射	辐射	理	过程	层	Exp URB	Exp NUBR
最外三层区域	Dudhia	Rrtm	WDM6	Noah	YSU	关闭	关闭
最里层区域	Dudhia	Rrtm	WDM6	Noah	MYJ	UCP-BEM	关闭

注: Dudhia: Dudhia, 1989; Rrtm: Mlawer et al., 1997; WDM6: Lim and Hong, 2010; Noah: Chen and Dudhia, 2001; MYJ: Janjic, 1994; UCP-BEM: Martilli et al., 2002 和 Salamanca et al., 2010

URB 在海岸线附近均形成了温度等值线密集区, 即

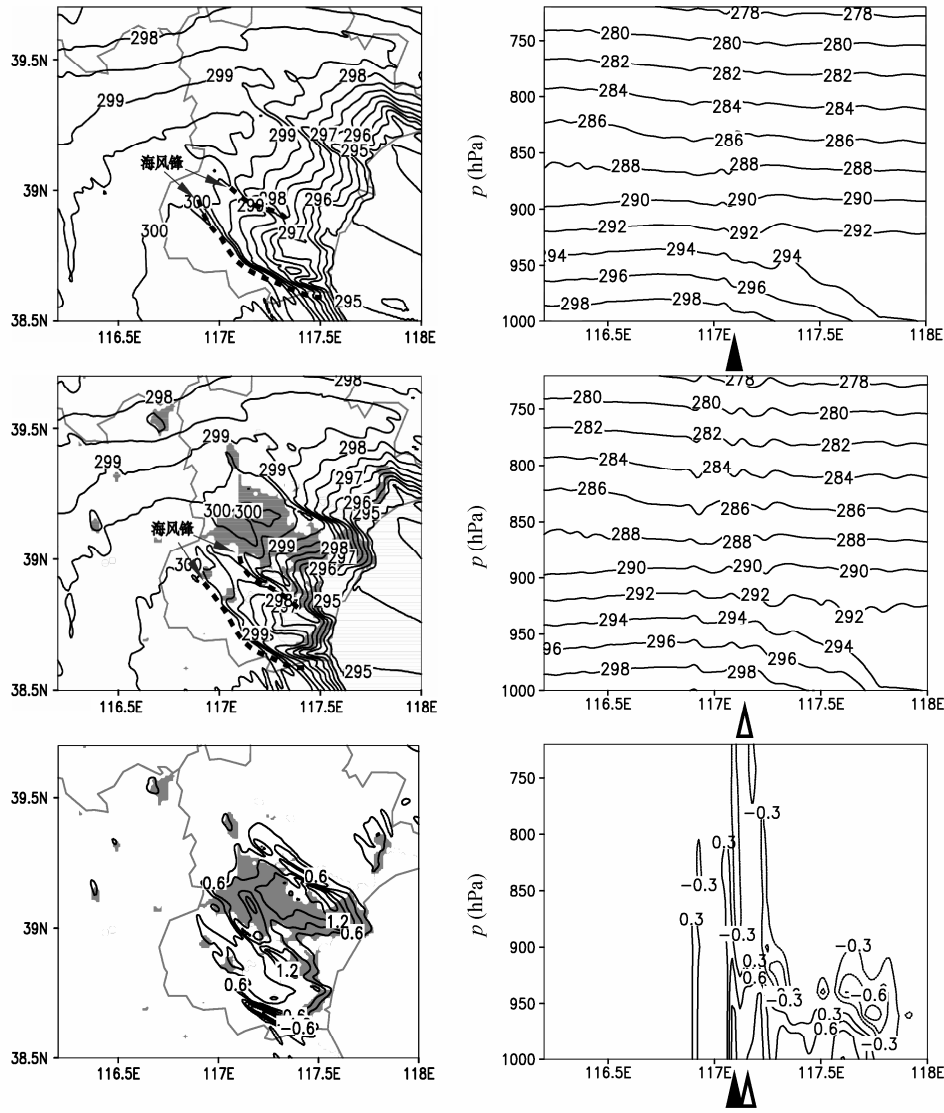


图 2 12:30 Exp NURB (上)、Exp URB (中) 和 Exp URB 减 Exp NURB (下) 的温度 (单位: K) 的水平 (左, 1000 hPa 等压面) 和垂直 (右, 沿 39.025°N) 分布; 阴影区为城市区域, 垂直分布图中 Exp NURB 和 Exp URB 的海风锋位置分别用实心 and 空心三角形标出, 下文图皆同
Fig. 2 Horizontal (left, at 1000 hPa) and vertical (right, along 39.025°N) distributions of temperatures (K) for Exp NURB (top), Exp URB (middle), and Exp URB minus Exp NURB (bottom) at 1230 BT (Beijing time). Shaded regions are urban areas, the locations of sea breeze front for Exp NURB and Exp URB in the vertical planes are marked with solid and hollow triangles, respectively (the same for the following figures)

明显的海陆热力差异, 这种差异的存在厚度均在 940 hPa 以下, 不同的是, 无论从温度的水平和垂直分布来看 Exp URB 的海陆热力差异均比 Exp NURB 大, 特别是在近地层。城市下垫面造成的较高海陆热力差异对海风的加强有促进作用。从两个数值试验的温度差异的水平和垂直分布 (图 2) 来看, 温度差异主要发生在城市下垫面, 并且城市下垫面使得低层气温明显增加, 增温区域达到 950 hPa, 同时, 增温区域上面出现了浅薄的减温区域。图 3 中两个数值试验的向上地表感热通量差异显示城市下垫面大大提升了向上地表感热通量 (包括了人为排放的热量), 这表明城市区域较大的向上地

表感热通量对低层较高气温的形成有重要贡献。此外, Exp URB 温度的水平和垂直分布 (图 2) 显示城市区域低层较高的气温并不足以使得海风的相对热力性质发生改变, 即由相对 (陆地气温) 较冷变为相对较暖。两个数值试验的水汽垂直分布和它们之间的水汽差异的水平和垂直分布 (图 4) 则显示城市下垫面使得海风锋背后水汽的增湿高度有所提升, 但增湿幅度有所下降, 即水汽分布厚度有所增加, 但水汽值出现减小。从两个数值试验的向上地表水汽通量差异的分布 (图 3) 可以看出, 城市下垫面较小的向上地表水汽通量对低层增湿的减弱有贡献。

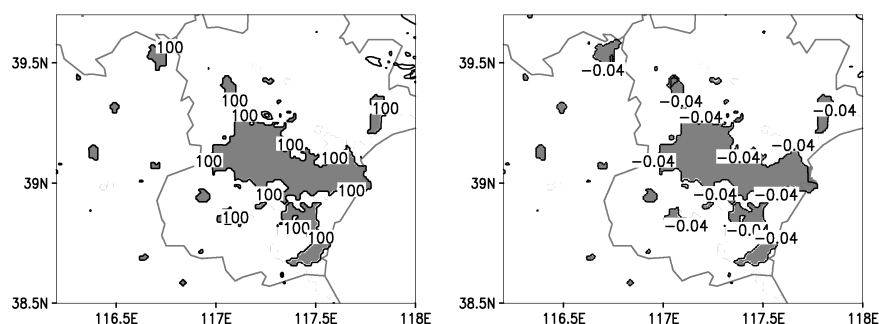


图 3 12:30 Exp URB 减 Exp NURB 的向上地表感热通量 (左, 单位: W m^{-2}) 和向上地表水汽通量 (右, 单位: $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 的分布

Fig. 3 Distributions of upward surface sensible heat (left) and moisture (right) fluxes (W m^{-2} and $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) for Exp URB minus Exp NURB at 1230 BT

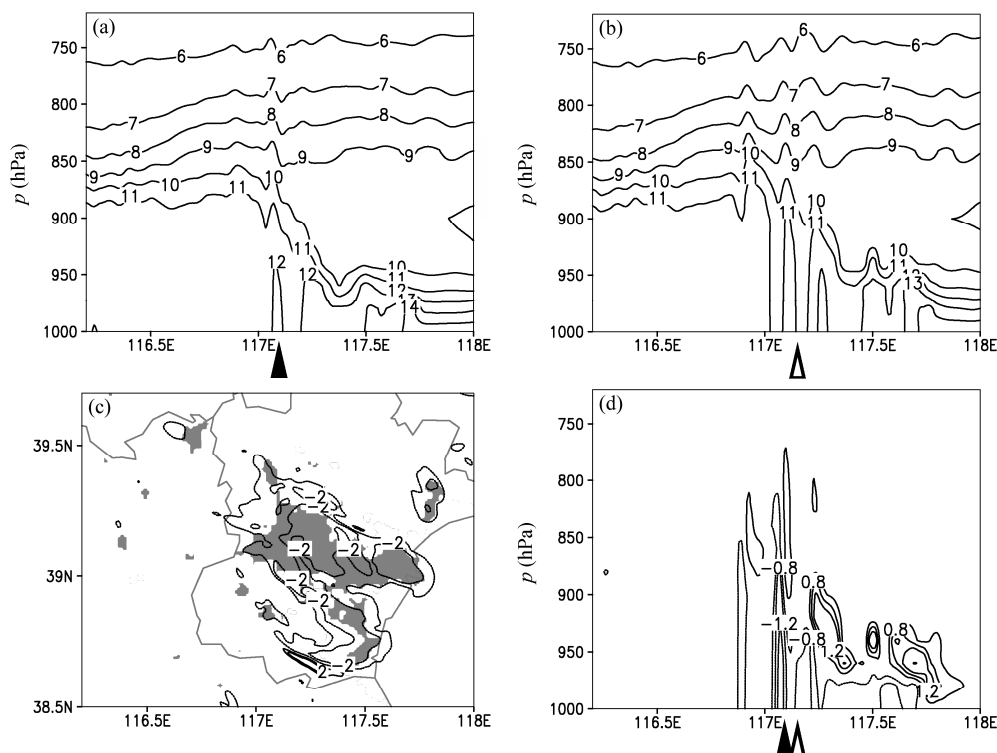


图 4 12:30 Exp NURB (a) 和 Exp URB (b) 的比湿 (单位: g kg^{-1}) 的垂直分布 (沿 39.025°N) 以及 Exp URB 减 Exp NURB 的比湿的水平 (c, 1000 hPa 等压面) 和垂直 (d, 沿 39.025°N) 分布

Fig. 4 Vertical (along 39.025°N) distributions of specific humidities (g kg^{-1}) for (a) Exp NURB and (b) Exp URB at 1230 BT; (c) horizontal (at 1000 hPa) and (d) vertical (along 39.025°N) distributions of specific humidity for Exp URB minus Exp NURB at 1230 BT

3.2 风场

两个数值试验的水平风速差异的水平分布（图 5）显示城市下垫面的高粗糙度明显减弱了近地层海风的风速，并且风速减弱区域达到 950 hPa，这与上面分析的城市下垫面造成的增温区域以及降湿区域高度非常一致。这是由于城市下垫面高粗糙度导致的海风风速减弱会使得冷湿海风

对低层大气的降温和增湿作用被削弱，从而更有利于城市区域低层较高温度和较低湿度的维持。同时，它说明了城市下垫面造成的海风锋背后低层较高温度和较低湿度是城市较大向上感热通量和较小向上水汽通量（热力性质），以及高粗糙度对冷湿海风的减弱（动力性质）共同作用的结果。海风锋是由海风与陆风在低层辐合所形成，因此，城市

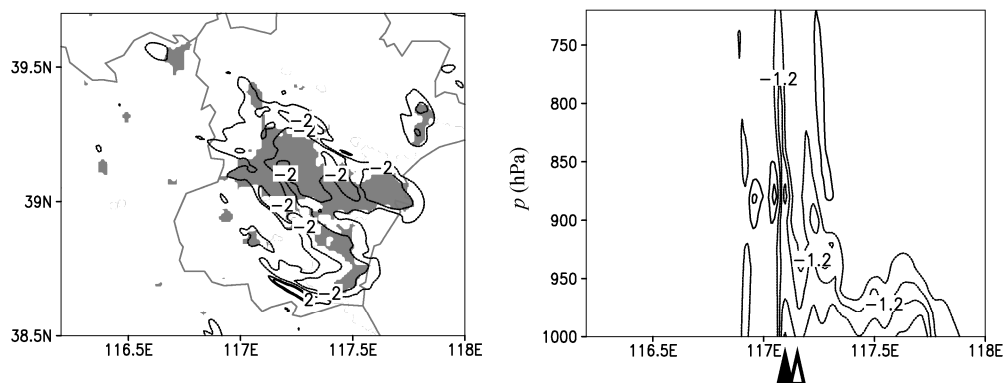


图 5 12:30 Exp URB 减 Exp NURB 的水平风速（单位： m s^{-1} ）的水平（左，1000 hPa 等压面）和垂直（右，沿 39.025°N ）分布
Fig. 5 Horizontal (left, at 1000 hPa) and vertical (right, along 39.025°N) distributions of horizontal wind speed (m s^{-1}) for Exp URB minus Exp NURB at 1230 BT

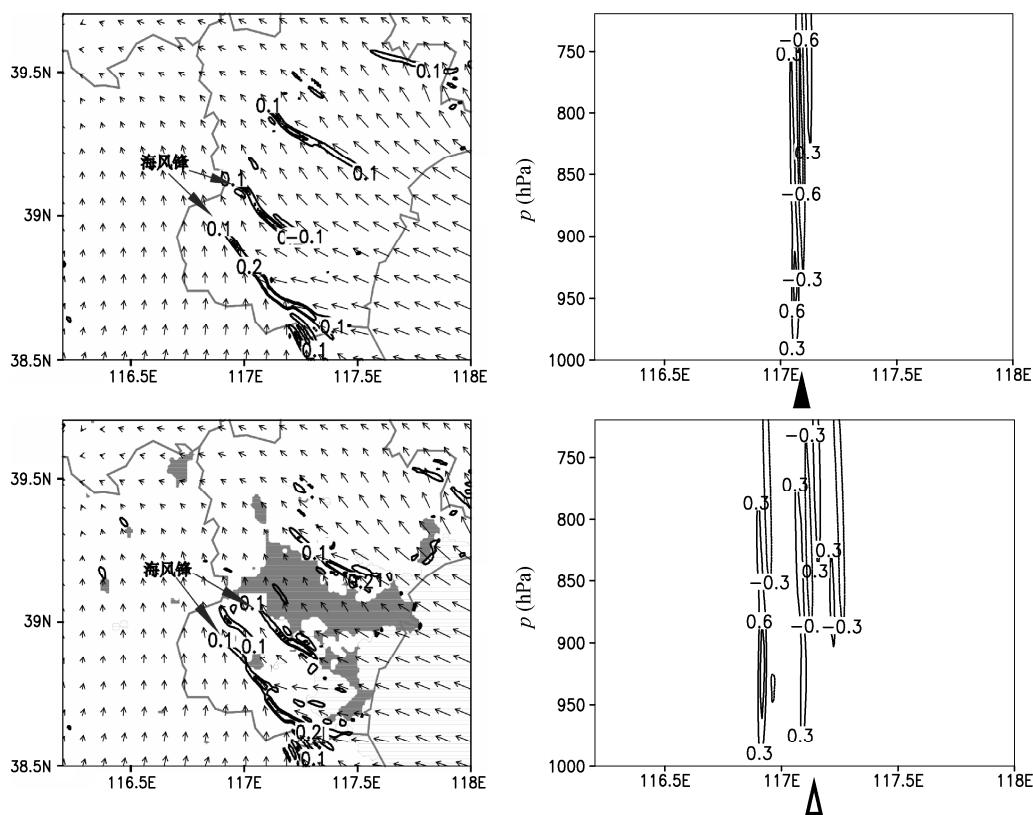


图 6 12:30 Exp NURB（上）和 Exp URB（下）的垂直运动（单位： m s^{-1} ）和风矢量的水平分布（左，1000 hPa 等压面）和垂直运动（单位： m s^{-1} ）的垂直分布（右，沿 39.025°N ）
Fig. 6 Horizontal distributions (left, at 1000 hPa) of vertical motions (m s^{-1}) and wind vectors and vertical distributions (right, along 39.025°N) of vertical motions (m s^{-1}) for Exp NURB (top) and Exp URB (bottom) at 1230 BT

下垫面对海风的减弱使得海风锋的低层辐合运动也有所减弱，同时造成了海风锋低层的辐合区往海洋方向偏移（图略）。对应辐散场的分布特点，两个数值试验的垂直运动分布（图 6）显示城市下垫面使得海风锋的上升运动发生减弱，并且造成了海风锋低层的上升运动区往海洋方向偏移，即海风锋往内陆推进距离稍微缩短。从垂直流场（图 7）来看，两个试验的海风锋背后均出现了明显的顺时针海风环流，不同的是，Exp URB 的海风锋环流相对 Exp NURB 的海风环流有所抬升。两个数值试验的垂直流场差异则显示城市下垫面的存在使得城市区域迎风侧（近海洋一侧）上空出现了逆时针的差异环流，环流中心位于 950 hPa 以下，该逆时针差异环流的形成与高粗糙度的城市下垫面对

顺时针海风环流的摩擦力效应有关。同时，差异环流的上升支气流区很好地对应了城市迎风侧上空浅薄的降温 and 增湿区。可见，城市下垫面的动力特性使得海风环流得到抬升，而冷湿海风的抬升使得城市区域上空的降温和增湿的垂直范围扩大。

3.3 有效位能和对流抑制

有效位能和对流抑制是对流运动发生的两个重要判据，而它们与大气的温湿状况密切相关，因此，城市下垫面对低层大气温湿状态的改变也将引起有效位能和对流抑制的变化。图 8 显示有效位能分布明显的区域与海风推进的范围一致，同时有效位能高值中心区位于海风锋的背后，这与海风锋背后充沛的冷湿海风对低层大气的降温增湿有关（梁钊明等，2013）。两个数值试验的有效位能差异的水平和垂直分布（图 8）则显示城市下垫面的存在使得海风锋背后的有效位能的垂直分布范围提升，但强度减弱，从而出现了 Exp URB 相对 Exp NURB 低层有效位能减少，而其上面有效位能却有所增加的现象。这与城市下垫面对水汽分布的影响结果一致。另外，从数值试验的对流抑制分布（图 9）来看，对流抑制高值区分布在有效位能高值区之上，城市下垫面使得有效位能垂直分布范围的提升促使对流抑制高值区也跟着上升，从而造成了低层对流抑制的减弱。相应地，Exp URB 与 Exp NURB 的差异分布显示低层对流抑制出现减小，其上面则出现增大的现象。另外，两个数值试验均显示有效位能的数值很大，而对流抑制却显得很小。

梁钊明等（2013）从模拟结果和理论上解释了冷湿海风对低层大气的增湿和降温会导致抬升凝结高度（LCL）和自由对流高度（LFC）的降低以及平衡高度（EL）的升高，从而导致有效位能的明显增加。上面对两个数值试验的温度和比湿分布差异的原因分析显示了城市下垫面的高粗糙度对海风的减弱以及城市下垫面较大的向上地表感热通量和较小的向上地表水汽通量的共同作用造成了海风锋背后冷湿海风对低层大气的降温和增湿幅度降低，这将导致 LCL、LFC 和 EL 发生变化。如图 10，在海风环流的背景下，城市下垫面的存在使得 LCL 和 LFC 均有所抬升，而 EL 则出现降低，在高空的温湿廓线没有明显变化的前提下（上面数值试验结果显示温度和比湿分别在 925 hPa 和 850

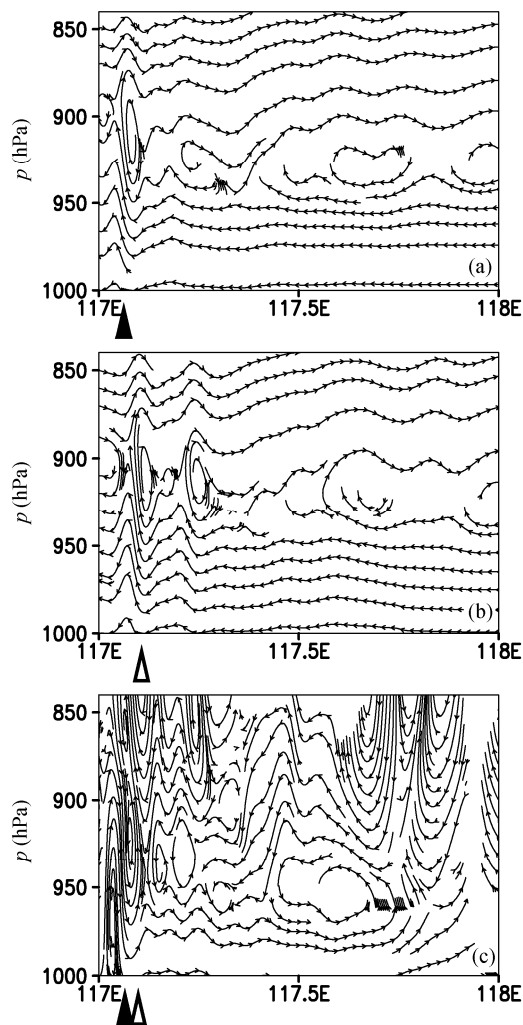


图 7 12:30 Exp NURB (a)、Exp URB (b) 和 Exp URB 减 Exp NURB (c) 的流线的垂直分布（沿 39.025°N）

Fig. 7 Vertical distributions (along 39.025°N) of streamlines for (a) Exp NURB, (b) Exp URB, and (c) Exp URB minus Exp NURB at 1230 BT

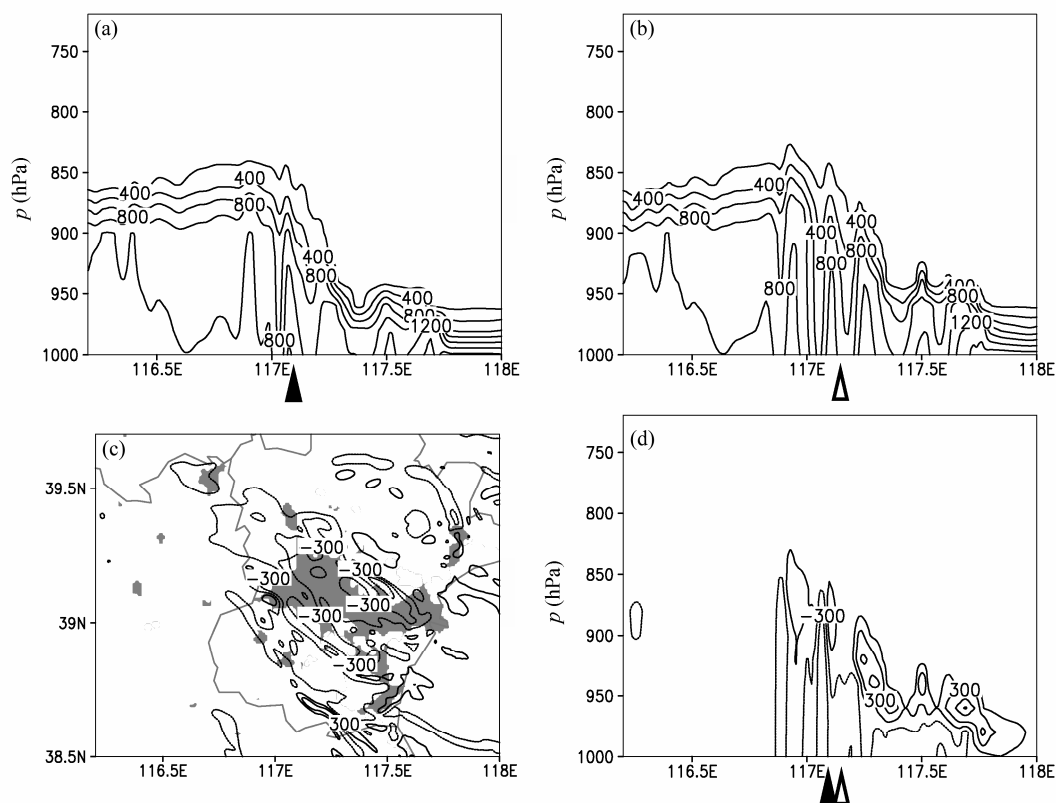


图 8 12:30 Exp NURB (a) 和 Exp URB (b) 的有效位能 (单位: J kg^{-1}) 的垂直 (沿 39.025°N) 分布以及 Exp URB 减 Exp NURB 的有效位能的水平 (c, 1000 hPa 等压面) 和垂直 (d, 沿 39.025°N) 分布

Fig. 8 Vertical distributions (along 39.025°N) of convective available potential energies (unit: J kg^{-1}) for (a) Exp NURB and (b) Exp URB at 1230 BT; (c) horizontal (at 1000 hPa constant pressure surface) and (d) vertical (along 39.025°N) distributions of convective available potential energy for Exp URB minus Exp NURB at 1230 BT

hPa 以上没有明显变化从某种程度上证实了该前提), 低层有效位能将发生减弱。这很好地解释了城市下垫面造成低层有效位能减弱的结果。另外, 上面分析显示, 高粗糙度的城市下垫面对海风环流的摩擦力效应使得冷湿海风有所抬升, 从而造成冷湿海风对低层大气的增湿和降温的垂直范围提升, 这是造成有效位能分布向高空扩展以及其导致对流抑制高值区抬升的原因。

3.4 静力和动力稳定度

图 11 显示了两个数值试验的干空气位温 (位温) 和广义位温 (Gao et al., 2004) 的垂直分布。对于位温, 两个数值试验均显示 1 km 以上大气层结是稳定的, 在其下面, 海风锋迎风侧 (近内陆一侧) 为均匀的位温场, 这是由于不稳定层结下气流发生混合所造成的, 而海风锋背风侧 (近海洋一侧) 则出现了热内边界层, 热内边界层厚度从海洋向海风锋递增。热内边界层内为偏中性层结, 其上面则为稳定层结。城市下垫面的热力和动力效应使得海岸

线附近的位温水平梯度增加、热内边界层向内陆延伸的距离减小, 以及热内边界层厚度有所增加, 即中性层结区增厚。其中中性层结区的增厚与城市下垫面的动力效应使得较冷海风对低层大气降温的垂直范围扩大有关。广义位温在位温的基础上考虑了水汽凝结几率, 因此, 它的总体分布与位温相一致, 不同的地方在于相对湿度高值区或云水物容易形成的地方出现了广义位温高值中心, 即强不稳定层结区域, 如近海面大气层和海风锋高空附近的云水物形成区。与数值试验的位温分布相似, 城市下垫面的热力和动力效应同样造成了海岸线附近广义位温的水平梯度加强、热内边界层增厚以及热内边界层往海洋方向偏移。

理查逊数 (Ri) 同时考虑了大气静力稳定性和垂直风切变的影响, 是判断大气稳定度的一个重要判据。 $Ri < 1$ 能反映不稳定 (Yang and Gao, 2006), 其中 $Ri < 0$ 为静力不稳定, $0 < Ri < 1$ 为动力不稳定。两个数值试验的干空气和非均匀饱和湿空气的理

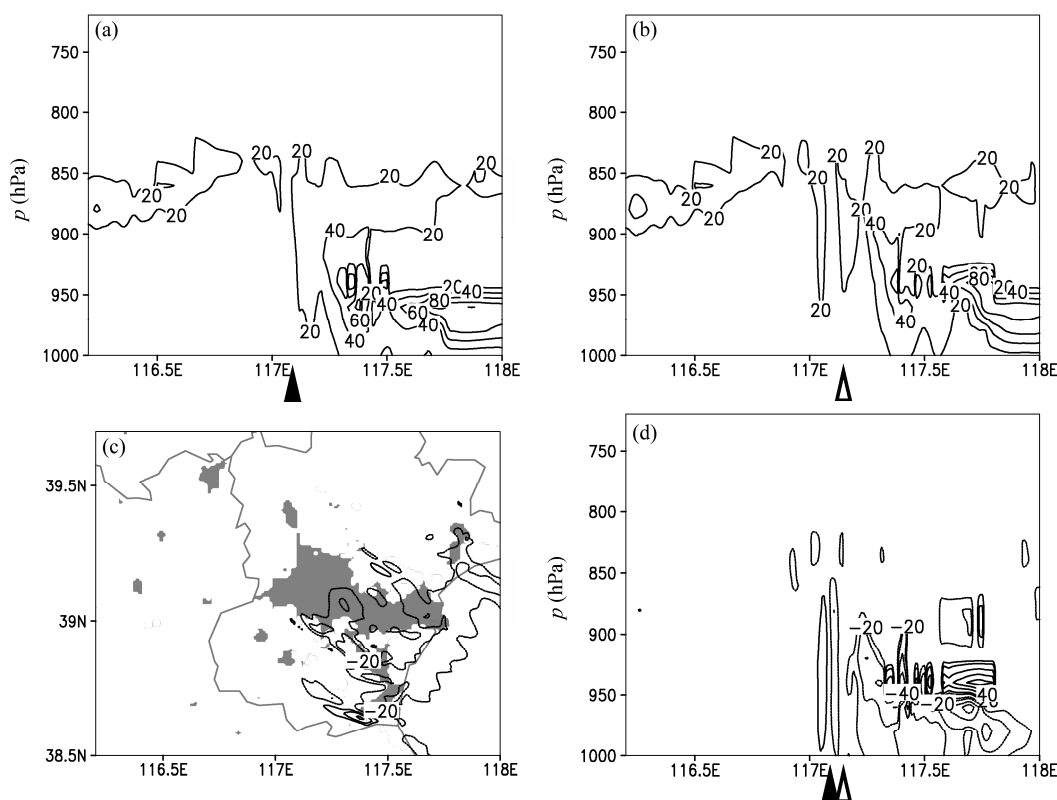
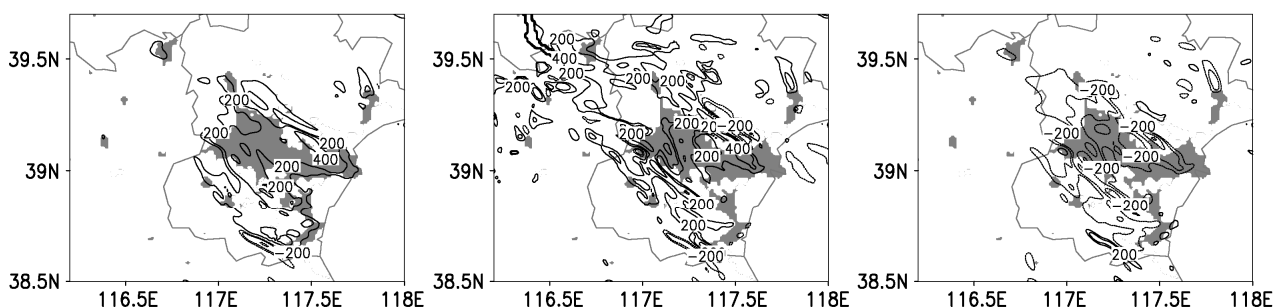
图9 同图8, 但为对流抑制 (单位: J kg^{-1})Fig. 9 Same as Fig. 8, but for convective inhibitions (unit: J kg^{-1})

图10 12:30 Exp URB 减 Exp NURB 的抬升凝结高度 (左)、自由对流高度 (中) 和平衡高度 (右) 的分布 (单位: m)

Fig. 10 Distributions of lifting condensation level (left), free convection level (middle), and equilibrium altitude (right) for Exp URB minus Exp NURB at 1230 BT (units: m)

查逊数 (即理查逊数中分别引入位温和广义位温, 简称为 Ri 和 Rig) 分布 (图 12) 显示, 对于干空气和非均匀饱和湿空气, 低层总不稳定区域 (Ri 或 Rig 小于 1 的区域) 厚度均没有明显的变化。其中 $Ri < 0$ 和 $Rig < 0$ 的区域很好地对应了位温和广义位温分布反映的大气不稳定层结区域 (即热内边界层内的区域)。 $0 < Ri < 1$ 和 $0 < Rig < 1$ (动力不稳定) 的区域均位于热内边界层之上, 城市下垫面的动力效应造成热内边界层变厚使得海风锋背后的动力不稳定区变薄。

4 结论和讨论

海风锋是与沿海地区强对流天气有着重要联系的边界层天气系统, 而城市化的快速发展改变了沿海地区的下垫面属性, 这会对海风锋的特征产生影响。鉴于此, 本文利用耦合了新一代城市物理方案 UCP-BEM (Urban Canopy Parameterization-Building Energy Model) 的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式开展数值试验, 分析了城市下垫面对渤海湾海风锋的风场 (水平风速场、散度场

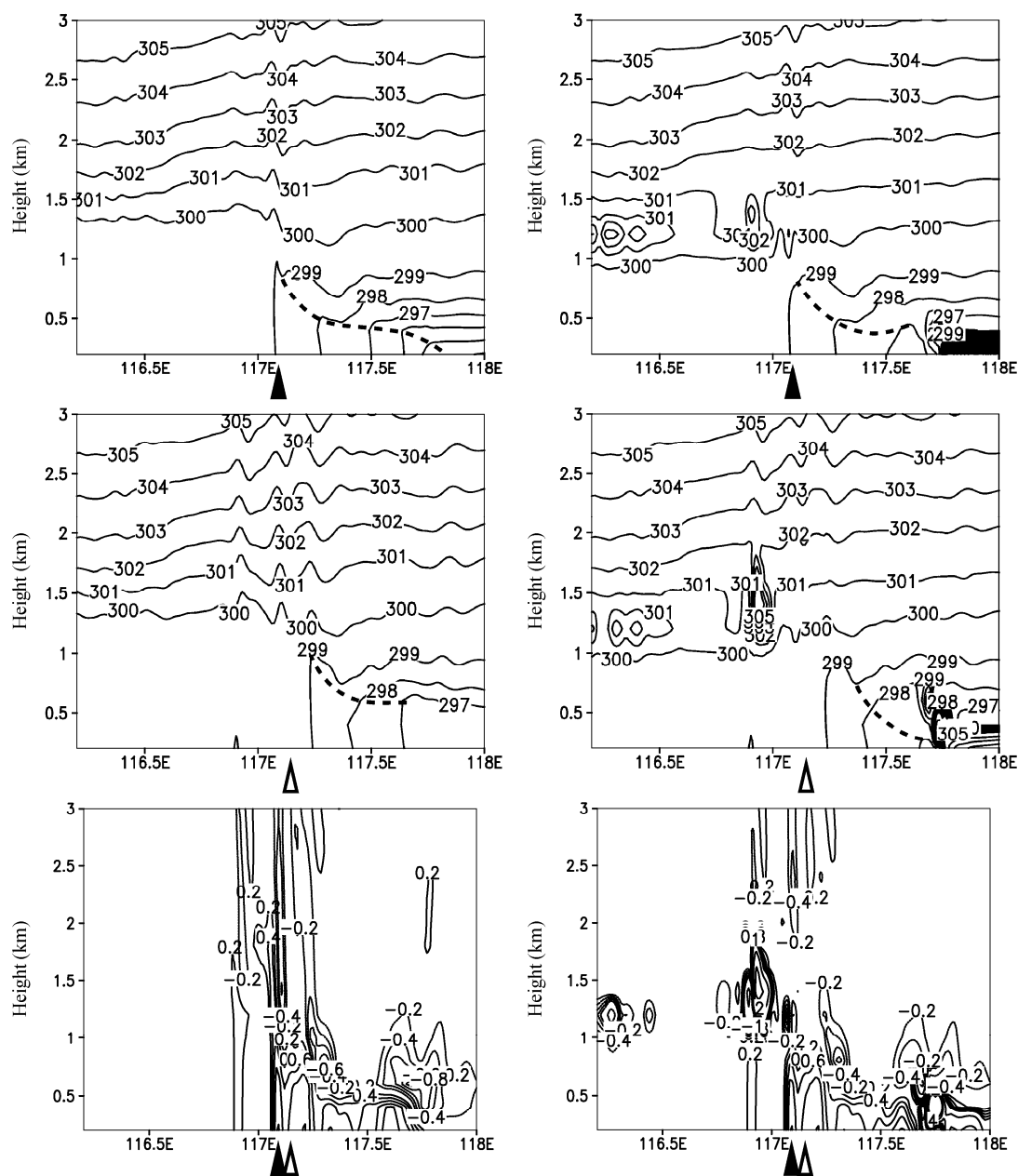


图 11 12:30 Exp NURB (上)、Exp URB (中) 和 Exp URB 减 Exp NURB (下) 的位温 (左) 和广义位温 (右) 的垂直分布 (沿 39.025°N , 单位: K), 虚线标记了热内边界层顶的位置

Fig. 11 Vertical distributions (along 39.025°N) of potential temperatures (left) and generalized potential temperatures (right) for Exp NURB (top), Exp URB (middle), and Exp URB minus Exp NURB (bottom) at 1230 BT (units: K), the locations of the top of thermal inner boundary layer are marked with dashed curves

和垂直速度场等)、温湿场和大气稳定性 (静力和动力稳定度以及有效位能等) 特征的影响, 分析结果显示:

(1) 城市下垫面的高粗糙度明显减弱了低层的海风风速, 使得海风锋向内陆推进的距离和海风锋低层上升运动的强度均有所减小。

(2) 城市下垫面的动力和热力特性造成的低层

海风风速减弱以及较大向上感热通量和较小向上水汽通量使得冷湿海风对低层大气的降温和增湿幅度均发生减弱。城市下垫面形成的热岛效应使得海陆热力梯度增大, 海风的驱动力得到加强, 但海风经过高粗糙度城市下垫面时近地面海风发生减弱, 同时城市下垫面对海风环流的摩擦力效应 (产生逆时针差异环流) 使得海风发生抬升, 冷湿

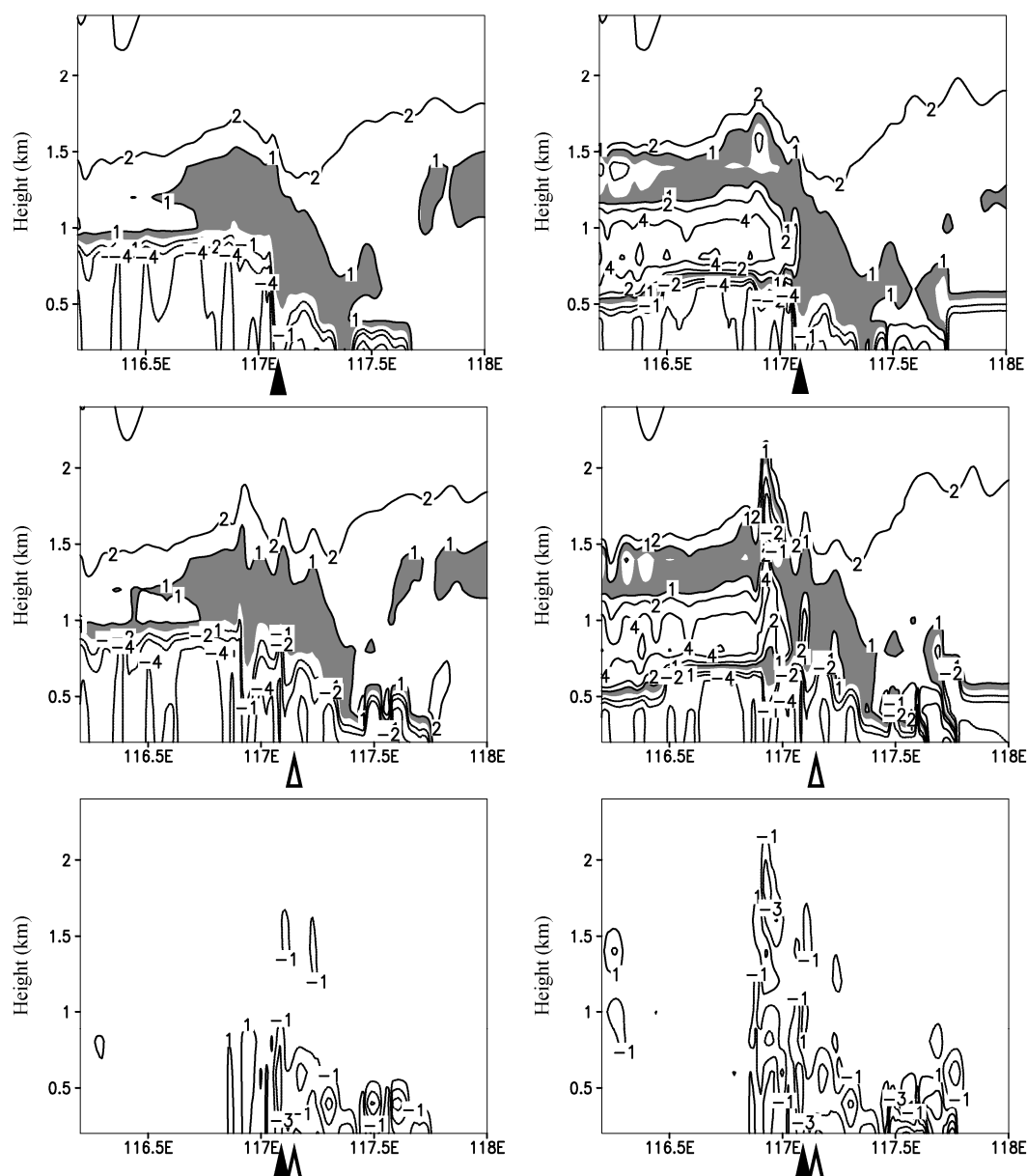


图 12 12:30 Exp NURB (上)、Exp URB (中) 和 Exp URB 减 Exp NURB (下) 的干空气 (左) 和非均匀饱和湿空气 (右) 的理查逊数的垂直分布 (沿 39.025°N), 灰色阴影区为理查逊数在 0 和 1 之间的区域

Fig. 12 Vertical distributions (along 39.025°N) of Richardson numbers of dry (left) and non-uniform saturated (right) atmospheres for Exp NURB (top), Exp URB (middle), and Exp URB minus Exp NURB (bottom) at 1230 BT. The shaded regions highlight the distributions of Richardson number between 0 and 1

海风的抬升使得大气降温和增湿的垂直范围有所提升。

(3) 城市下垫面的热力和动力效应造成冷湿海风对低层大气的降温和增湿幅度的减弱使得海风锋背后低层的有效位能减小, 而城市下垫面的摩擦力效应对冷湿海风的抬升造成的低层大气降温和增湿的垂直范围提升使得有效位能的垂直分布范围扩大, 这进一步造成了对流抑制高值区

的抬升。

(4) 城市下垫面的动力效应导致海风锋背后低层的静力不稳定区变厚, 这进一步使得静力不稳定区上面的动力不稳定区变薄, 但低层不稳定区总厚度基本不变。

本文开展的数值试验是基于渤海湾地区的一次海风锋过程, 因此, 以上分析结果对地域和个例的敏感性需要进一步的探讨分析。

参考文献 (References)

- Chen, F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 569–585.
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modeling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *Int. J. Climat.*, 31: 273–288.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46: 3077–3107.
- Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L12113.
- Janjic Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 927–945.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Kusaka H, Kimura F. 2000. The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 78 (4): 405–420.
- 梁钊明, 高守亭, 王彦. 2013. 渤海湾地区一次碰撞型海风锋天气过程的数值模拟分析 [J]. *气候与环境研究*, 待刊. Liang Zhaoming, Gao Shouting, Wang Yan. 2013. A numerical simulation study of a collision-type sea breeze front case in the Bohai Bay region [J]. *Climatic and Environmental Research in Chinese*, In press.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 1587–1612.
- 陆希, 寿绍文. 2009. 珠三角地区海陆风的数值模拟及城市化对其影响研究 [J]. *安徽农业科学*, 37 (1): 312–315. Lu Xi, Shou Shaowen. 2009. Numerical simulation on land and sea breeze over the Pearl River Delta region and effects of urbanization [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese)*, 37 (1): 312–315.
- Martilli A, Clappier A, Rotach M W. 2002. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 104: 261–304.
- 苗曼倩, 唐有华. 1998. 长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化的影响 [J]. *高原气象*, 17 (3): 280–289. Miao Manqian, Tang Youhua. 1998. Interaction between sea and land breeze and heat island circulation during the summer over the delta region of the Yangtze River and urbanization effect on climate [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 17 (3): 280–289.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated- k model for the long-wave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 16663–16682.
- Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—Part I. Formulation, verification and a sensitive analysis of the model [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 99: 331–344.
- Skamarock WC, et al. 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3[M/OL]. 52–54. (2012–11–12). http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.
- 文伟俊, 沈桐立, 丁治英, 等. 2009. 城市化对广西夏季海陆风影响的数值试验 [J]. *热带气象学报*, 25 (3): 350–356. Wen Weijun, Shen Tongli, Ding Zhiying, et al. 2009. Effects of urbanization on land–sea breeze of Guangxi in summer: WRF simulation study [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 25 (3): 350–356.
- Yang S, Gao S T. 2006. Modified richardson number in non-uniform saturated moist flow [J]. *Chinese Physics Letters*, 23 (11): 3003–3006.