

文章编号: 1000-0534(2009)06-1250-10

利用 RAMS 模式对山谷城市冬季局地风场的数值模拟

李江林¹⁻³, 陈玉春¹, 吕世华¹, 李万莉¹, 陈雷华¹⁻²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境与灾害实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 利用美国科罗拉多州立大学和 MRC/ASTER 发展的中尺度数值模式 RAMS, 采用三重嵌套的方法, 模拟研究了兰州山谷地区局地环流特征。结果表明: (1) 兰州市近地面流场以偏东风为主, 在城市东西部之间的狭窄地带, 风速相对较大些, 在东西部山谷城市中心区域有大片的静风区; 冬季兰州市山谷夜间是辐合流场, 白天是辐散流场。受城市热岛环流的影响, 白天热岛环流抑制谷风环流, 夜间增大山风环流, 夜间的山风风速大于白天的谷风风速。(2) 白天, 兰州市区山顶和山谷之间上空气柱以下沉气流为主, 这主要是由于地形作用使得白天盛行谷风环流和山峰加热作用的共同影响。夜间, 兰州市区山顶和山谷之间上空以上升气流为主, 这主要是由于地形作用使得市区和山谷在夜间盛行山风环流, 但是冬天夜间兰州市区和山谷上空有较厚的逆温层存在, 抑制了气流的上升运动。(3) 在午后 13:00 左右, 兰州市区山谷从近地面到 400 m 高度, 辐散场在逐渐减弱, 在 510 m 左右的高度转变为辐合场; 皋兰山顶上空从近地面到 400 m 高度, 辐合场在逐渐减弱, 在 510 m 左右的高度转变为辐散场。在凌晨 01:00 左右, 兰州市区山谷从近地面到 400 m 高度, 辐合场在逐渐增强, 到 400 m 高度达到最强, 从 400 m 到 510 m 高度又逐渐减弱; 皋兰山顶上空从近地面到 220 m 左右的高度, 辐散场在逐渐减弱, 在 400 m 左右的高度辐散场转变为辐合场, 从 400 m 到 510 m 左右的高度, 皋兰山顶的辐合场逐渐增强。

关键词: 兰州地区; RAMS 模式; 局地环流; 数值模拟

中图分类号: P463.3 **文献标识码:** A

1 引言

风是与空气污染密切相关的参数。排放到大气中的污染物在风的作用下, 会被输送到其它地区, 风速越大, 单位时间内污染物被输送的距离越远, 混入的空气质量越多, 污染物浓度越低, 所以风不但对污染物进行水平搬运, 而且有稀释冲淡的作用^[1]。兰州市位于青藏高原东北边缘, 在南北两山夹峙的黄河河谷盆地内, 由于特殊的河谷盆地使得该地区以静风天气居多, 不利于污染物的排放。因此, 研究该地区风场的变化对认识兰州市空气污染产生的原因有重要意义。缪培俊等^[2]研究指出, 从地面到 300 m 高度层内风速对污染都有明显的影响; 王式功等^[3]利用观测资料统计分析了兰州市城

区大气边界层冬半年各月不同层次的盛行风向、平均风速及其随高度的变化规律, 基本上搞清了不同方位的频数、不同层次的平均风速和污染系数分别与空气污染物浓度的关系; 刘宇等^[4]利用观测资料分析了风速日变化、年变化、年际变化以及风随高度的变化规律; 邱崇践等^[5]在有限的条件下, 利用数值模拟的方法模拟出了兰州市地面风场的基本特点; 蒲朝霞等^[6]利用二维数值模式模拟出了兰州山谷风环流与观测事实基本一致; 吕世华等^[7]利用 MM5 模式对兰州市冬季局地环流进行了模拟分析; 缪国军等^[8]和安兴琴等^[9]分别利用 WRF 和 MM5V3 模式, 模拟了 1989 年和 1994 年冬季 12 月中旬晴空条件下兰州的山谷风环流。这些研究结果, 有助于认识兰州市的近地面风场特征。

收稿日期: 2008-10-20; 改回日期: 2009-08-28

基金项目: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所引进人才基金项目(0684291001)资助

作者简介: 李江林(1983-), 男, 陕西宝鸡人, 助理工程师, 主要从事大气边界层与数值模拟研究。E-mail: lijianlin@lzb.ac.cn

但是由于兰州地区局地环流受特殊地形动力和热力影响,极为复杂,而且常规观测站点又稀少,代表性差,资料连续性也差。所以本文在前人的研究基础上利用一个中尺度气象模式 RAMS 模拟的方法,选取近几年天气晴朗的一个时间段,将模拟结果与观测资料进行了对比,以检验模拟结果的合理性。另外,对兰州市南北向昼夜典型时刻垂直环流特征及其影响因子以及兰州市山谷地区冬季昼夜局地环流特征的辐散场进行了具体个例分析。

Cox 等^[10]曾比较了 RAMS、MM5、RAMS、NOPAPS6 和 RWM 模式的模拟性能,发现 RAMS 模式模拟性能最佳,MM5 模式次之。Zhong 等^[11]利用 VTMX 试验观测数据,检验了 MM5、RAMS 和 NCEP Meso-Eta 在高分辨率配置下的模拟性能,指出,MM5 和 RAMS 模式能更好地捕捉山谷风环流。

2 模式系统介绍和试验设计

本文所选用的模式为中尺度气象模式 RAMS^[12]。RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)模式的动力框架是非流体静力、原始方程中尺度模式,模式的垂直坐标采用 σ 地形跟随坐标。模式系统考虑了比较详细的微物理过程,其中

包含有分辨率很高的土壤层模式,具有多用途、多功能的特点,包含了多种物理过程及其参数化方法。可按研究模拟的需求选择各种不同的物理过程及数值方法,加上具有多重嵌套的功能,故模拟范围十分具有弹性。在模拟复杂地面条件的大气边界层上具有一定优势。姜金华等^[13]和彭新东等^[14]用 RAMS 模式与 HYPACT 扩散模式相结合,研究了兰州市污染物与大气边界层特征的关系,并证明此模式系统在该地区具有良好的模拟能力。一些学者也将 RAMS 模式用于珠峰北坡绒布河谷地区,模拟该地区的局地环流和边界层特征,并取得了良好的效果^[15-16]。

模拟的初始时间为 2005 年 12 月 14 日 08:00 (北京时,下同),至 19 日 08:00,共计 120 h,前 24 h 用于陆面模块能量的闭合。模式采用三重网格嵌套系统,模拟区域的中心位于 36.08°N, 103.8°E(图 1)。母域和子域为同一中心,粗细网格距分别为 15, 5 和 1 km;格点数分别为 40×30, 42×32 和 68×50;模式采用地形追随坐标, σ 面垂直分层为 25 层,各层厚度随高度增加而增加,其中最小厚度约为 35 m,最大厚度为 1000 m(表 1)。模拟试验中参数化方案的选择如下:选用 Chen/Cotton 长短波辐射参数化方案;Klemp/Wilhelmson 侧边界

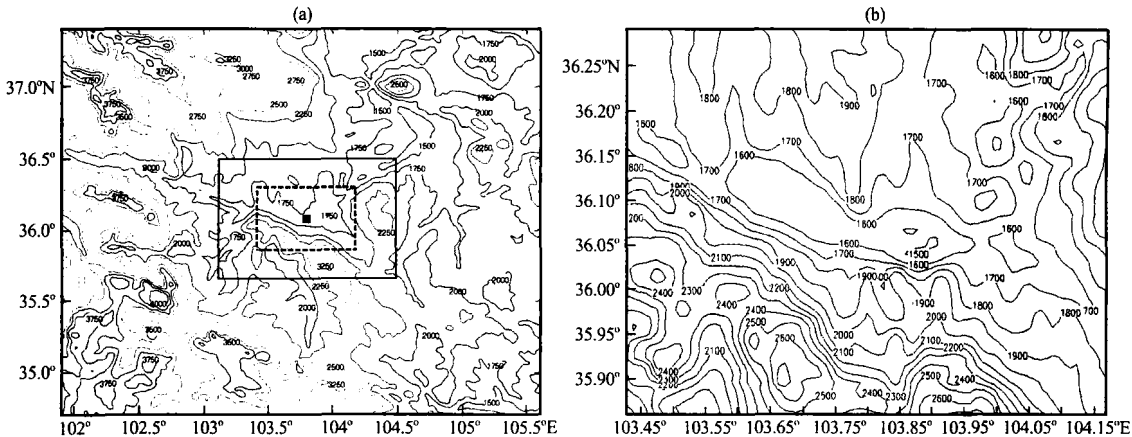


图 1 模式三重嵌套试验区域(a)及第三重模拟区域地形高度(b)
Fig. 1 Domain of the triple nested model (a) and the topography of nesting structure of grid 3(b)

表 1 模拟区域三重嵌套模式结构
Table 1 Model configuration of nesting structure of 3 grids

网格域	中心坐标 /°N, °E	网格点数	水平格距 /km	时间步长 /s	高度 /km
1	36.08, 103.8	40×30	15	30	9915
2	36.08, 103.8	42×32	5	10	9915
3	36.08, 103.8	68×50	1	2	9915

条件;第一重和第二重网格嵌套选用积云对流参数化方案,第三重网格嵌套不采用积云对流参数化方案;土壤—植被模式(LEAF-2)。模式使用NCEP/NCAR的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料(6 h 间隔)经处理后作为RAMS模式的初始条件和边界条件,地形用30 s分辨率的DEM资料。模式每隔1 h 输出一次模拟结果。选取的分析时段内天气晴好。

3 模拟结果验证

利用西部之光项目“兰州市南北两山绿化气候环境效益评估的观测和数值模拟研究”的2005年冬季皋兰山绿化区的观测资料,对模拟的近地面(16 m)的风速和温度与观测的2.5 m 高实况大气温度、水平风场进行了对比。

图2是模拟的近地面气温与实测值的比较,观测点位于皋兰山山顶的灌木林中。由图2可看出,模拟值和观测值在两天内的变化趋势基本一致,二者的相关系数为0.87。模拟值比观测值普遍偏大,但是二者的趋势一致,模拟值的峰值落后观测值1~2 h。这可能是由于模拟的近地面气温的高度(16 m)比观测的近地面高度(2.5 m)高,感热通量从地面向上传播所需的时间较长。

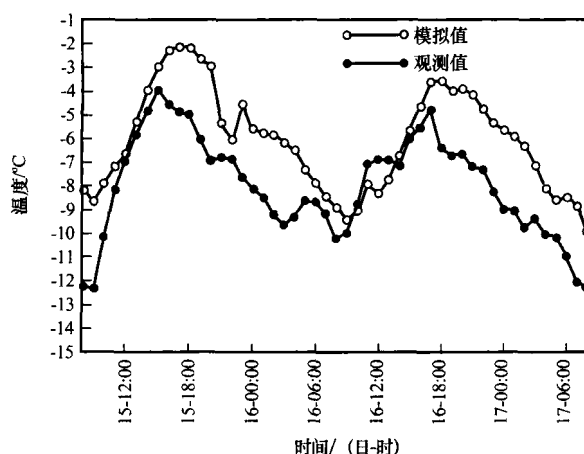


图2 模拟的近地面温度与观测值对比

Fig. 2 Comparison of the simulated near surface temperature and the observed value

图3是模拟的近地面风向和实测值的比较。由图3可看出,RAMS模式模拟风向变化趋势与实测值的变化趋势基本一致,模拟与实测的相关系数为0.36。对于风速模拟效果一般(图略),这是由于风速变化的不确定性和湍流的随机性决定的。另外,次网格地形和植被问题也是一个重要原因^[17],所有中尺度气象模式都面临着这个问题。但是,模拟

的风向与实测风向值在趋势上基本一致,较好地反映了风向的变化。

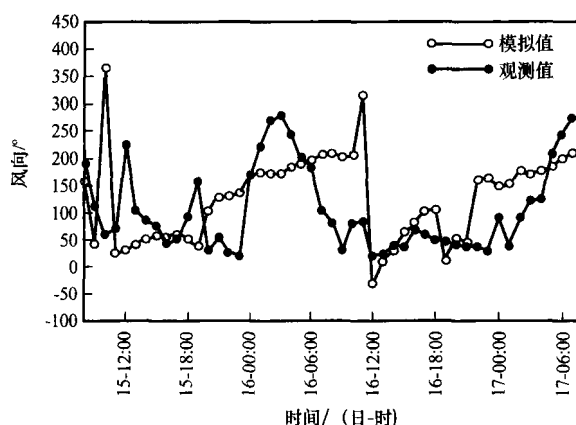


图3 模拟的近地面风向与观测值对比

Fig. 3 Comparison of the simulated horizontal wind direction and the observed value

4 模拟结果分析

4.1 对山谷风环流的数值模拟

4.1.1 对典型个例近地面水平流场的模拟

图4a, b 分别是数值模拟的夜间和白天近地面水平风矢量图。从图4a可以看出,白天13:00左右,兰州市区山谷近地面水平流场以辐散为主,辐散中心分别在几个地势较低的地方都表现出来,风向由山谷吹向周围山体,主要表现为谷风,山谷盆地辐散中心都是静风区。这主要是由于白天山坡增温比山谷快,导致空气自山谷沿山坡上升。兰州市及其周围山区近地面水平流场以偏东风为主,在东部谷口处风向是从市区吹向山谷外的偏西风,风速约为 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;西部谷口处风向是从市区吹向山谷外的偏东风,风速约为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。市区东西部之间的狭窄地带风速较大,风速约为 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这与风速的狭管效应有关。南北两山山顶都是以偏东风为主,南边皋兰山顶的风速 $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大于北边白塔山山顶的风速 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图4b可以看出,在夜间01:00左右,在南北两山地势较高的地方风向由南北两山向兰州市山谷地区辐合,辐合中心在城市山谷东部表现的更为明显,盆地中心风速较小,为静风区。一方面,这是由于夜间山谷下垫面辐射冷却,近坡面空气迅速变冷,沿山坡下滑形成下坡山风;另一方面,由于城市热岛效应引起的热岛环流使得城市周围空气流入城市,风向向热岛中心辐合。兰州市区及地势较低的地方以偏东风为主,这在市区西部表现的更为明显。在东部谷口处

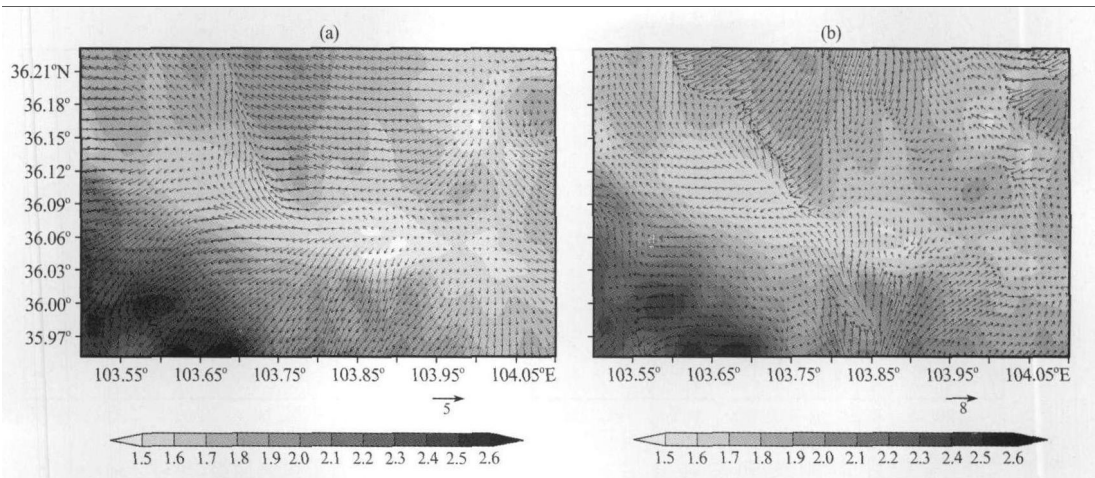


图 4 2005 年 12 月 15 日 13:00 和 16 日 01:00 兰州地区近地面(16 m)水平风矢量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 13:00, (b) 01:00, 阴影区为地形高度(单位: m)

Fig. 4 The vectors of wind near the ground (16 m) on the Lanzhou area at 13:00 on 15 and 01:00 on 16 December 2005. Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Shaded area is terrain height, unit: m

风向是从谷外吹向市区的偏东风, 风速约为 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 在西部谷口处风向是由谷外吹向市区的偏西风, 风速约为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在城市山谷东西部之间的狭窄地带, 由于狭管效应, 风速仍然相对较大些, 约为 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。南边皋兰山顶风向是偏西南风, 风速约为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 北边白塔山顶为偏东北风, 风速约为 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由图 4 可看出, 兰州市近地面流场以偏东风为主, 城市山谷地区风速较小, 有大片的静风区域。在城市东西部的狭窄地带, 风速相对较大。兰州市山谷冬季夜间是辐合流场, 白天是辐散流场。但是随着城市热岛效应的增强, 导致白天热岛环流抑制谷风环流的作用; 夜间增大山风环流。这与前人的研究结果一致^[8-9, 18]。因此, 夜间的山风风速大于白天的谷风风速, 这一点与傅抱璞^[19]的理论计算结果一致。

4.1.2 对近地面平均水平流场的模拟

对近地面(16 m)4 天中 13:00 的平均水平风场图分析(图略), 可以看出, 白天典型时刻兰州市区山谷平均水平流场以辐散为主, 辐散中心在山谷地势较低的地方都有所体现, 山谷风速较小, 为静风区, 东西部山谷之间的狭窄地带, 风速最大为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这与 12 月 15 日 13:00 的水平风场情况相类似。不同之处在于, 北山的平均水平风场以偏西风为主, 而北山的水平风场以偏东风为主, 山谷中风速大于平均风速。从近地面(16 m)4 天中 01:00 的平均水平风场图(图略)可以看出, 夜间典型时刻兰州市区山谷平均水平流场以辐合为主, 风向由南

北两山吹向山谷, 东西部山谷中心风速为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 东西部之间的狭窄地带风速较大, 为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这与 16 日 01:00 的水平风场情况相类似。不同之处在于, 16 日 01:00 东部山谷中心为静风区, 西部山谷风速较大, 为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

总体来说, 白天、夜间典型时刻兰州山谷中平均水平流场分别与 12 月 15 日 13:00 和 16 日 01:00 水平流场的情况相一致, 即白天山谷中以辐散场为主, 吹谷风; 夜间山谷以辐合场为主, 吹山风。不同之处在于山谷的风速略有不同, 山顶的风向有所差别。

4.2 对南北向剖面垂直风速和温度的模拟

4.2.1 对典型个例南北向垂直风速和温度的模拟

图 5 是沿 103.85°E 做南北向垂直风速剖面图, 图 5a 是中午 13:00 的垂直风速分布。由图可看出, 在中午, 南北两山上空气流有明显的上升运动, 而且南山上空比北山上空的上升气流更强烈, 南山上空两个垂直速度中心的速度分别为 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 上升的高度分别达到 450 m 和 500 m, 而北山上空的上升气流稍弱。在 36.06°N 的城市上空为气流下沉运动的高值区, 下沉速度达到 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 35.99°N 的山谷上空也是气流下沉运动的高值区, 下沉速度达到 $0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 5b 是凌晨 01:00 的垂直风速分布。由图可以看出, 在夜间, 南北两山上气流有明显的下沉运动, 而且南山上空比北山上空的下沉气流更强烈, 南山上空两个下沉速度中心的速度分别为 $0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.3

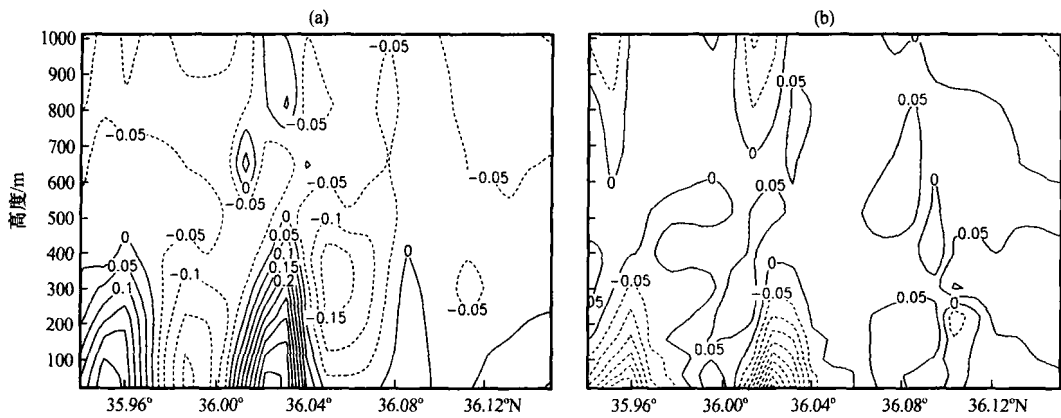


图 5 2005 年 12 月 15 日 13:00 和 16 日 01:00 沿 103.85°E 南北向的垂直风速剖面(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 5 Vertical cross-section of the simulated speed on S—N along the 103.85°E at 13:00
on 15 and at 01:00 on 16 December 2005. Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 下沉气流可达到的高度分别为 320 m 和 300 m, 而北山上空的下沉气流却很弱。在 36.06°N 的城市上空, 气流是上升运动, 上升速度为 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 35.99°N 的山谷上空气流也是上升运动, 上升速度为 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从图 5 中还可看出, 中午 13:00, 在 500~1000 m 之间整个气流以下沉为主; 凌晨 01:00, 在 350~850 m 之间整个气流以上升为主。

图 5 还显示, 利用 RAMS 中尺度模式不仅可以模拟出兰州市山谷城市上空的垂直速度变化, 而且能模拟出空间更小的两山之间山谷上空的垂直速度变化。因此, 将 RAMS 中尺度模式用在地形条件复杂的兰州地区, 模拟结果更为理想。

图 6 是沿 103.85°E 做南北向温度场垂直剖面图。从图 6a 中可以看出, 午后 13:00, 在同一高度处, 35.96°N、36.03°N 上空的气温相对较高些, 根据张强等^[20]和安兴琴等^[21]研究发现, 白天山峰对

大气具有加热作用。由于白天山峰的加热作用, 使得山顶上空空气产生了上升运动, 在较高层辐合后下沉, 形成了两个山峰之间的山谷上空(35.99°N)的下沉气流。这与高峰等^[22]的研究结果一致。另外, 由于白天地形作用产生的谷风环流使得山谷空气辐散, 从而使下沉气流加强。兰州市区低层温度由于热岛效应相对较高, 这种热岛效应可以抑制城市上空的下沉气流, 在图 6a 上表现为山谷(35.99°N)上空的下沉速度比城市(36.06°N)上空的下沉速度大 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在夜间形成山谷上空(35.99°N)的上升气流的主要原因是地形作用引起的山风在谷中辐合, 从而形成上升气流。从图 6b 中可以看出, 在凌晨 01:00, 山谷上空(35.99°N)和城市上空(36.06°N)都有较强的逆温存在, 逆温层厚度达到 600 m。这种逆温的存在抑制了这两支气流的上升运动, 使得上升速度为 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

兰州市区上空白天以下沉气流为主, 这主要是

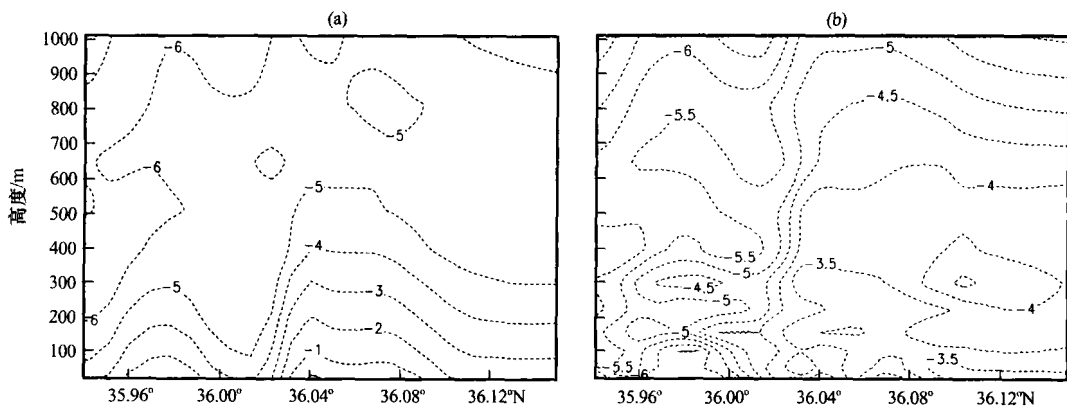


图 6 2005 年 12 月 15 日 13:00 和 16 日 01:00 沿 103.85°E 的南北向温度场垂直分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 6 Vertical cross-section of the simulated temperature fields on S—N along the 103.85°E
at 13:00 on 15 and 01:00 on 16 December 2005. Unit: $^{\circ}\text{C}$

由于地形作用使得白天盛行谷风环流, 市区近地面是辐散流场, 高空是辐合流场, 从而形成了城市上空气流的下沉运动, 南北两山上空的上升气流。在山顶之间的山谷中, 由于地形作用和山峰加热作用的共同影响, 也可以形成下沉气流, 而且这种下沉气流强于城市上空的下沉气流。夜间兰州市区上空和山顶之间的山谷上空以上升气流为主, 这主要是由于地形作用使得市区和山谷在夜间近地面是辐合场, 从而形成了城市上空气流的上升运动, 南北两山上空的下沉运动。虽然夜间城市热岛作用的存在有利于形成城市上空的上升气流, 但是冬天夜间兰州市区和山谷上空有较强的逆温存在, 逆温的存在抑制了气流的上升运动, 从而使得上升速度较弱。这种白天以下沉气流为主, 夜间上升气流的强度又弱, 不利于兰州上空空气污染物的扩散。

4.2.2 对南北向剖面平均垂直风速的模拟

从 4 天内 13:00 沿 103.85°E 南北向平均垂直风速剖面图中可看出(图略), 500 m 以下平均垂直风速与 15 日 13:00 的相一致, 即南北两山上都有明显的上升气流, 南山的上升气流强于北山, 最大上升速度分别为 $0.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 比 15 日 13:00 的上升气流弱; 对应的 36.02°N 上空的上升气流的高度比 15 日 13:00 的高, 可达到 900 m 高度。而城市上空对应的则是下沉气流, 下沉速度为 $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 同样比 15 日 13:00 的下沉气流弱; 在 35.99°N 山谷上空的下沉气流的高度比 15 日 13:00 的高度高, 可达到 1000 m。从 4 天内 01:00 沿 103.85°E 平均南北向垂直风速剖面图可以看出(图略), 400 m 以下平均垂直风速与 16 日 01:00 的相一致, 即南北两山上以下沉气流为主, 南山的下沉气流比较强烈, 下沉中心的速度分别为 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 比 16 日 01:00 的下沉速度稍小。在城市上空气流是上升运动, 上升速度是 $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 36.02°N 对应的 400 m 高度以上, 空气以下沉运动为主。

总体来说, 白天 13:00 左右 500 m 以下平均垂直风速与 15 日 13:00 左右的垂直风速上升、下沉的情况基本一致。不同之处是, 平均垂直风速的上升和下沉中心的垂直速度略小。夜间 01:00 左右 400 m 以下的平均垂直风速与 16 日 01:00 左右的垂直风速上升、下沉的情况基本一致。不同之处是, 平均垂直风速的上升和下沉中心的垂直速度略小。

4.3 对不同高度上散度场的模拟

4.3.1 对典型时刻不同高度上散度场的模拟

图 7a、c、e、g 分别是 12 月 15 日 13:00 的 16, 220, 400, 510 m 高度的散度场图。从图 7a、c、e 可以看出, 在中午 13:00, 从近地面 16 m 一直到 400 m 的高度, 在兰州市区山谷上空以及其它地势较低的山谷上空, 基本都是散度的正值区, 即为流场辐散区; 在整个山顶上空, 基本上都是散度的负值区, 即为流场的辐合区。这一点在皋兰山顶表现的尤为明显。在 16 m 高的近地面(图 7a), 兰州市区山谷中为较强的辐散区, 辐散中心强度为 $60\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$; 在皋兰山顶为较强的辐合区, 辐合中心强度为 $-150\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。在 220 m 高度(图 7c), 兰州市区山谷上空的辐散区强度减弱的很快, 基本上散度为 0 s^{-1} ; 皋兰山顶的辐合区, 辐合中心强度虽然没有变, 仍为 $-150\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 但是辐合区域的范围比 16 m 高度的范围小一些。在 400 m 的高度(图 7e), 兰州市区山谷上空的辐散区强度仍然很小, 在山谷东西之间的狭窄地带范围较小的负值区出现, 即有辐合场出现, 中心强度为 $-50\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。而皋兰山顶的负值区略微向北偏移, 中心强度减弱为 $-100\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 范围明显减小。但在山顶有较弱的正值区出现, 即为辐散流场。在 510 m 高度(图 7g), 兰州市区山谷出现一个范围较大的辐合区, 中心强度为 $-50\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$; 而皋兰山顶的负值区已经明显向北偏移, 并且完全转变为正值区, 即流场由辐合场转变为辐散场, 辐散中心强度为 $50\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。

图 7b、d、f、h 分别为 12 月 16 日 01:00 的 16, 220, 400, 510 m 高度的散度场图。从图 7b、d 可以看出, 在凌晨 01:00, 从近地面到 220 m 左右的高度, 兰州市区山谷以及其它地势较低的山谷上空散度场基本是负值区, 即为辐合流场, 这一点在兰州市区山谷的东部表现的尤为明显; 在整个山顶上空, 基本上都是散度的正值区, 即为辐散流场, 这一点在皋兰山顶表现的尤为明显。从图 7f、h 可以看出, 从 400 m 到 510 m 左右的高度, 兰州市区山谷以及其它地势较低的山谷上空散度场为仍然是负值区, 即为辐合流场。在皋兰山顶, 散度场的正值区已经转变为负值区, 即由辐散流场转变为辐合流场。在 16 m 的近地面(图 7b), 兰州山谷东部上空的散度场为负值区, 即为流场的辐合区, 辐合中心强度为 $-100\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$; 而皋兰山顶上空的散度场为正值区, 即为流场的辐散区, 辐散中心强度为 $300\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。在 220 m 高度(图 7d), 兰州市区东部山谷上空的负值区范围虽然有所减小, 但中心强

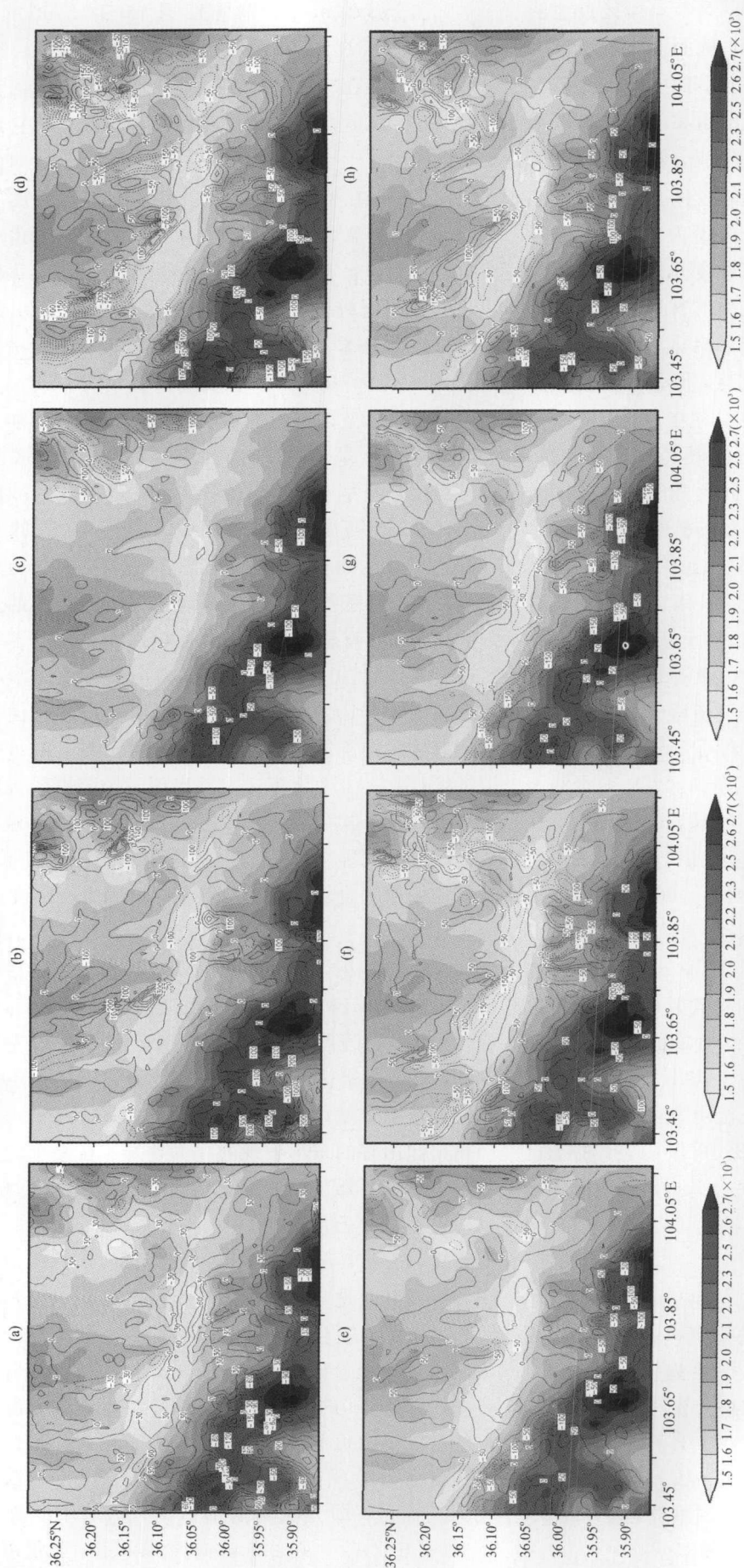


图 7 2005 年 12 月 15 日 13:00 和 16 日 01:00 不同高度上的散度场 (单位: $\times 10^{-5}$)
(a), (c), (e), (g) 分别为 15 日 13:00 的 16, 220, 400, 510 m 高度的散度场,
(b), (d), (f), (h) 分别为 16 日 01:00 的 16, 220, 400, 510 m 高度的散度场

Fig. 7 The simulated divergence fields on different vertical levels at 13:00 on 15 and at 01:00 on 16 December 2005. Unit: $\times 10^{-5}$.
(a), (c), (e), (g) the divergence fields on 16, 220, 400, 510 m at 13:00 on 15,
(b), (d), (f), (h) the divergence fields on 16, 220, 400, 510 m at 01:00 on 16

度却在增强, 为 $-150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 即辐合中心的强度在增大; 而皋兰山顶上空正值区的中心强度在减小, 为 $200 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。在 400 m 高度(图 7f), 整个兰州市山谷东西部上空都是负值区, 即都是辐合流场, 辐合中心强度为 $-150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 而皋兰山顶上空开始由正值区转变为负值区, 即由辐散场转变为辐合场, 且西部山顶的负值区强于东部山顶的负值区, 辐合中心强度为 $-100 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。在 510 m 高度(图 7h), 整个兰州市山谷东西部上空负值区的范围和强度都有所减小, 即辐合流场在减弱, 辐合中心强度减小为 $-100 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 而皋兰山顶上空已由正值区转变为负值区, 即流场完全转变为辐合场, 西部山顶的辐合中心强度为 $-150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

可以看出, 在中午 13:00 左右, 兰州市区山谷从近地面到 400 m 高度是以辐散场为主, 但是辐散场在逐渐减弱; 在 510 m 左右的高度, 兰州市区山谷上空的辐散场转变为辐合场。皋兰山顶上空从近地面到 400 m 高度是以辐合场为主, 但是辐合场在逐渐减弱, 转变为辐散场, 在 510 m 左右的高度完全转变为辐散场。结合图 3a 可以看出, 白天兰州市区山谷上空下沉气流下降到 500 m 左右的高度与市区上空辐散场的高度相一致, 皋兰山顶上空上升气流上升到 500 m 左右的高度与山顶上空的辐合场的高度相一致。在凌晨 01:00 左右, 兰州市区山谷从近地面到 400 m 高度是以辐合场为主, 且辐合场在逐渐增强, 在 400 m 高度达到最强, 从 400 m 到 510 m 高度又逐渐减弱。皋兰山顶上空从近地面到 220 m 左右的高度是以辐散场为主, 但是辐散场在逐渐减弱, 在 400 m 左右的高度, 辐散场已经转变为辐合场, 从 400 m 到 510 m 左右的高度, 皋兰山顶的辐合场逐渐增强。结合图 3b 可以看出, 夜间兰州市区山谷上空上升气流上升到 400 m 左右的高度与市区上空辐合场的高度相一致, 皋兰山顶上空下沉气流下降到 250 m 左右的高度与山顶上空辐散场的高度相吻合。

4.3.2 对不同高度平均散度场的模拟

从 4 天中 13:00 的 16, 220, 400, 510 m 高度的平均散度场可以看出(图略), 山谷城市上空近地面 16 m 高度的平均散度为正值区, 即为流场的辐散区, 散度中心强度为 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 位于兰州山谷东侧。而皋兰山顶为平均散度的负值区, 即流场的辐合区, 辐合中心强度为 $-150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。在 220 m 高度, 兰州市区山谷上空仍为辐散区, 散度

中心强度仍为 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 但是较 16 m 高度时的范围较小。东西部山谷之间有个范围较小、强度为 $-50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 散度的负值区。皋兰山顶的南侧有散度的正值区存在, 即为辐散区, 辐散中心强度为 $150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 北侧为辐合区, 辐合中心强度为 $-100 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 辐合区域的范围比 16 m 高度的范围小一些。在 400 m 高度, 兰州山谷上空北侧的辐散区强度为 $90 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 南侧为辐合区, 辐合中心强度为 $-60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。而皋兰山顶的负值区, 中心强度减弱为 $-60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 负值区的范围明显减小; 山顶南侧辐散流场仍然存在, 辐散中心的强度为 $150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。在 510 m 高度, 兰州市区山谷中心出现一个范围较大的辐合区, 中心强度为 $-100 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 而皋兰山顶的负值区已经明显向北偏移, 并且已转变为正值区, 即流场由辐合场变为辐散场, 辐散中心强度为 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

从 4 天中 01:00 的 16, 220, 400, 510 m 高度的平均散度场可以看出(图略), 兰州山谷靠近南山脚下上空的散度场为负值区, 即为流场的辐合区, 辐合中心强度为 $-100 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 山谷东西两侧的散度几乎为 0 s^{-1} 。皋兰山顶上空的散度场为正值区, 即为流场的辐散区, 辐散中心的强度为 $200 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。在 220 m 高度, 兰州市区东西部山谷上空的负值区范围增大, 中心强度为 $-100 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 即辐合中心的强度增大; 而皋兰山顶上空正值区的中心强度在减小, 为 $150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 而且范围也比在 16 m 高度时有所缩小。在 400 m 高度, 整个兰州市山谷西部上空几乎都是散度的负值区, 中心强度为 $-60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 在山谷东部上空散度几乎为 0 s^{-1} ; 而皋兰山顶上空开始由正值区转变为负值区, 即由辐散场转变为辐合场, 辐合中心强度为 $-60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 原来的正值区略微向北偏移。在 510 m 高度, 整个兰州市山谷东西部上空正值区的范围都有所增大, 即辐散流场在增强, 辐散中心强度为 $-30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 而皋兰山顶上空也已经由正值区转变为负值区, 即流场转变为辐合场, 西部山顶的辐合中心强度为 $-90 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

通过以上分析, 可以看出, 4 天中 13:00 的不同高度的平均散度场与 15 日 13:00 的散度场相类似。在兰州市区山谷上空, 从近地面到 400 m 高度基本上都是散度的正值区, 即为流场辐散区; 到 510 m 高度, 辐散场消失转变为辐合场。在皋兰山顶上空, 近地面到 400 m 高度基本都是散度的负值区, 即为流场辐合区; 到 510 m 高度, 山顶的辐合

场变为辐散场。4 天中 01:00 的不同高度的平均散度场与 16 日 01:00 的散度场相类似。在兰州市区山谷上空,从近地面到 400 m 高度基本都是散度的负值区,即为流场辐合区;到 510 m 高度,辐合场消失转变为辐散场。在皋兰山顶上空,从近地面到 220 m 高度基本都是散度的正值区,即为流场辐散区,辐散强度随着高度在减弱;到 400 m 高度散度场变为负值区,即为辐合流场;到 510 m 高度,山顶的辐合场加强。平均散度场与 16 日 01:00 的散度场差别在于山谷城市上空从 400 m 到 510 m 高度,辐合场消失转变为辐散场。

5 结论

利用 RAMS 中尺度模式,模拟了兰州山谷地区局地环流场特征,结合 12 月 15 日 13:00 和 16 日 01:00 与 4 天平均环流场分析,得到以下主要结论:

(1) 模式较成功地模拟了兰州山谷城市局地环流特征,并能模拟出空间更小的两山之间山谷上空的垂直速度变化。用 RAMS 中尺度模式模拟地形条件复杂的兰州地区比较适用。

(2) 兰州市近地面流场以偏东风为主,除了在城市东西部之间的狭窄地带,风速相对较大些,平均风速约为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;城市山谷地区有大片的静风区,风速几乎为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种静风区不利于兰州市上空大气污染污染物的扩散。

(3) 兰州市山谷冬季近地面夜间是辐合流场,白天是辐散流场。但是随着近年来城市热岛效应的增强,导致白天热岛环流抑制谷风环流的作用;夜间,增大山风环流。因此,夜间的山风风速大于白天的谷风风速。

(4) 白天,兰州市区上空和山顶之间的山谷上空以下沉气流为主,这种下沉气流可以达到 400~500 m 的高度,强度为 $-0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这主要是由于地形作用使得白天盛行谷风环流和山峰加热作用的共同影响。夜间,兰州市区上空和山顶之间的山谷上空以上升气流为主,上升气流较弱,可以达到的高度为 300~400 m 之间,强度为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这主要是由于地形作用使得市区和山谷在夜间盛行山风环流。夜间城市热岛作用的存在有利于形成城市上空的上升气流,但是冬天夜间兰州市区和山谷上空有较强的逆温存在,抑制了气流的上升运动,使得上升速度较弱。这种白天以下沉气流为主,夜间上升气流的强度又弱,不利于兰州上空大气污染物的扩散。

(5) 在中午 13:00 左右,兰州市区山谷从近地面到 400 m 高空是以辐散场为主,辐散场在逐渐减弱;在 510 m 左右的高空,辐散场转变为辐合场。皋兰山顶上空从近地面到 400 m 高空是以辐合场为主,辐合场在逐渐减弱,在 510 m 左右的高空,完全转变为辐散场。在凌晨 01:00 左右,兰州市区山谷从近地面到 400 m 高空是以辐合场为主,辐合场在逐渐增强,到 400 m 高空达到最强,从 400 m 到 510 m 高空逐渐减弱;皋兰山顶上空从近地面到 220 m 左右的高空是以辐散场为主,辐散场在逐渐减弱,到 400 m 左右的高空,辐散场转变为辐合场,从 400 m 到 510 m 左右的高空,皋兰山顶的辐合场逐渐增强。平均散度场与 16 日 01:00 的散度场差别在于山谷城市上空从 400 m 到 510 m 高度,辐合场消失转变为辐散场。

参考文献

- [1] 蒋维楣,孙鉴泞,曹文俊,等. 空气污染气象学教程[M]. 北京:气象出版社,2004
- [2] 缪培俊. 1978 年 12 月兰州大气污染与气象条件[C]. 大气湍流扩散及污染气象论文集. 北京:气象出版社,1982:122-128
- [3] 王式功,杨德保,尚可政,等. 兰州市城区冬半年低空风特征及其与空气污染的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1997,33(3):97-105
- [4] 刘宇,王式功,尚可政,等. 兰州市低空风时空变化特征及其与空气污染的关系[J]. 高原气象,2002,21(3):322-326
- [5] 邱崇践,胡泽勇. 兰州附近地区地面风场的数值模拟实验[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1987,23(2):97-100
- [6] 蒲朝霞,邱崇践. 兰州地区山谷风环流的二维数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1991,27(2):169-175
- [7] 吕世华,陈玉春,安兴琴. 兰州盆地局地环流及逆温形成的数值模拟[J]. 高原气象,2001,20(增刊):1-7
- [8] 缪国军,张镭,舒红. 利用 WRF 对兰州冬季大气边界层的数值模拟[J]. 气象科学,2007,27(2):169-175
- [9] 安兴琴,陈玉春,吕世华. 中尺度模式对冬季兰州市低空风场和温度场的数值模拟[J]. 高原气象,2002,21(2):186-192
- [10] Cox R, B L Bauer, T Smith. A mesoscale model intercomparison[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(2):265-283
- [11] Zhong S, J Fast. An evaluation of the MM5, RAMS, and meso-Eta models at subkilometer resolution using VTMX field campaign data in the Salt Lake valley[J]. Mon Wea Rev, 2003, 131(7):1301-1322
- [12] Pielke R A, W R Cotton, R L Walko, et al. A comprehensive meteorological modeling system RAMS [J]. Meteor Atmos Phys, 1992, 49:69-91
- [13] 姜金华,彭新东. 复杂地形城市冬季大气污染的数值模拟研究[J]. 高原气象,2002,21(1):1-7
- [14] 彭新东,姜金华. 城市大气污染物扩散模拟系统开发[J]. 高

- 原气象, 2002, 21(2): 139—144
- [15] 张美根, 马舒坡, 许丽人, 等. 珠峰北坡绒布河谷局地环流的模拟分析[J]. 高原气象, 2007, 26(6): 1146—1150
- [16] 朱凌云, 张美根, 马舒坡, 等. 珠峰绒布河谷大气边界层结构的数值模拟[J]. 高原气象, 2007, 26(6): 1208—1213
- [17] Hanna S R, R Yang. Evaluation of mesoscale models, simulations of near-surface winds, temperature gradients, and mixing depths[J]. J Appl Meteor, 2001, 40(6): 1095—1104
- [18] 陈榛妹, 王世红. 兰州市风场特征分析[C]//陈长和, 黄建国, 程麟生, 等编. 复杂地形上大气边界层和大气扩散的研究. 北京: 气象出版社, 1993: 193—204
- 京: 气象出版社, 1993: 23—27
- [19] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [20] 张强, 吕世华, 张广庶. 山谷城市大气边界层结构及输送能力[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 346—353
- [21] 安兴琴, 胡隐樵, 吕世华, 等. 山峰加热效应的数值试验研究[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 286—292
- [22] 龙学著, 余金香, 黄建国, 等. 兰州城区冬季 SO₂ 大气环境容量研究[C]//陈长和, 黄建国, 程麟生, 等编. 复杂地形上大气边界层和大气扩散的研究. 北京: 气象出版社, 1993: 193—204

Numerical Simulation of Local Circulation in Valley City in Winter Using RAMS Model

LI Jiang-lin¹⁻³, CHEN Yu-chun¹, LÜ Shi-hua¹, LI Wan-li¹, CHEN Lei-hua¹⁻²

(1. Laboratory for Climate Environment and Disasters of Western China, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The characteristics of local circulation in valley city were simulated using the mesoscale numerical model RAMS developed by Colorado State University and the MRC/ASTER and triple-nested simulation method. The results are as follows: (1) Wind direction near the ground of the Lanzhou city is main from east to west, and the wind speed is relatively larger more in the narrow area between the eastern and western city. In the eastern and western center of the valley city have large areas of the static wind zone; near the surface wind in the valley city of Lanzhou is convergence in the winter night, and during the day is a divergence flow. By the effect of the urban heat island circulation, the daytime heat island circulation inhibiting the valley breeze circulation, increased night-time mountain breeze circulation, and the velocity of the mountain breeze at night is larger than the velocity of the valley breeze in the daytime. (2) During the day, there is downdraft above the Lanzhou city and the valley between the mountains. It's mainly due to the terrain effect and the heating effect of mountain peak. At night, there is updraft above the Lanzhou city and the valley between the mountains. It's mainly due to the terrain effect which makes mountain breeze circulation in the night, while there is strong inverse temperature in exist above the Lanzhou city and the valley between mountains which restrain the updraft of the air in the winter night. (3) Around 13:00, the divergence gradually weakened from the near surface to 400 m heights above the Lanzhou city, then it turned into convergence at the heights of 510 m; the convergence gradually weakened from the near surface to 400 m heights above the Gaolan mountain, then it turned into divergence at the heights of 510 m. Around 01:00, the convergence gradually weakened from the near surface to 400 m heights above the Lanzhou city and was strongest at the height of 400 m, and then it gradually weakened from 400 m to 510 m heights; the divergence gradually weakened from the near surface to 220 m height, then it turned into convergence at the heights of 400 m. The convergence gradually enhanced from 400 to 510 m heights above Gaolan mountain.

Key words: Lanzhou area; RAMS model; Local circulation; Numerical simulation