

王改利, 刘黎平, 邱崇践, 等. 2010. 多普勒激光雷达风场反演方法研究 [J]. 大气科学, 34 (1): 143–153. Wang Gaili, Liu Liping, Qiu Chongjian. 2010. A study of wind field retrieval from Doppler lidar observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 143–153.

# 多普勒激光雷达风场反演方法研究

王改利<sup>1</sup> 刘黎平<sup>1</sup> 邱崇践<sup>2</sup> 刘智深<sup>3</sup> 吕博<sup>4</sup> 牟容<sup>5</sup>

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 兰州大学, 兰州 730107

3 中国海洋大学, 青岛 266100

4 山东省气象局, 济南 250031

5 重庆市气象局, 重庆 401147

**摘 要** 采用三维变分同化反演 (3DVAR)、四维变分同化反演 (4DVAR) 对多普勒激光雷达资料反演风场的方法进行了研究, 利用车载多普勒激光雷达在 2008 年残奥会测试赛期间外场试验取得的数据, 反演了海面 10 m 高度处的风场, 并将风场反演结果与浮标资料进行了对比分析, 结果表明: 3DVAR、4DVAR 风场反演方法均能实现近海面风的精细化风场反演, 并能反映出风向的变化, 反演风场与浮标数据基本一致, 在风速较大的天气情况, 3DVAR 与 4DVAR 反演风场的一致性要好于风速较小的天气情况; 4DVAR 反演方法中以浮标资料作为背景场, 使得其与浮标的符合程度要好于 3DVAR 方法反演风场; 反演风场的风向与浮标风向具有很好的相关关系, 反演风场的风速与浮标风速具有一定的相关关系, 反演风场的风向、风速与浮标的风向、风速之间平均均方根误差和平均绝对误差表明, 这两序列之间具有一定差别, 在风速较小的天气情况下使用时需要注意。

**关键词** 多普勒激光雷达 三维变分同化反演 四维变分同化反演 风场反演 结果分析

**文章编号** 1006-9895 (2010) 01-0143-11

**中图分类号** P406

**文献标识码** A

## A Study of Wind Field Retrieval from Doppler Lidar Observations

WANG Gaili<sup>1</sup>, LIU Liping<sup>1</sup>, QIU Chongjian<sup>2</sup>, LIU Zhishen<sup>3</sup>, LÜ Bo<sup>4</sup>, and MU Rong<sup>5</sup>

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

2 Lanzhou University, Lanzhou 730107

3 Ocean University of China, Qingdao 266100

4 Shandong Meteorological Administration, Ji'nan 250031

5 Chongqing Meteorological Administration, Chongqing 401147

**Abstract** Based on the three-dimensional variational data assimilation retrieval (3DVAR) and four-dimensional variational data assimilation retrieval (4DVAR) methods, experiments of wind retrieval from Doppler lidar data were performed. Both the 3DVAR and 4DVAR methods were applied to the Paralympics test events in May 2008, observed by the vehicle-borne Doppler lidar. The retrieval wind field was analysed by comparing with the buoy data. The results demonstrated that both the 3DVAR and 4DVAR methods were able to retrieve the detailed wind field near the sea surface, which could reflect the variation of wind direction, and accorded with the buoy data basically.

**收稿日期** 2008-10-09, 2009-04-20 收修定稿

**资助项目** 中国气象局资助项目“小型车载非相干多普勒测风激光雷达系统研制”、“激光雷达在 2008 奥帆赛气象保障中的应用”, 中国气象科学研究院科研业务费资助项目 2007Y004

**作者简介** 王改利, 女, 1973 年出生, 高级工程师, 研究方向: 雷达气象。E-mail: wgl3111@cams.cma.gov.cn

The wind field retrieved with the 3DVAR method was more consistent with that with the 4DVAR method under the gale weather than gentle breeze. It also showed that the wind field retrieved with the 4DVAR method was more close to wind from the buoy data than that with the 3DVAR method, because the buoy data were used as the background field in the 4DVAR method. It was found that there was a very good correlation between the retrieved and buoy's wind directions, while there would be some correlation between the retrieved and buoy's wind speeds. The difference between the retrieved and buoy's wind directions (speeds) could be shown from the mean RMS error and the mean absolute error, so the retrieved wind should be used with caution under the gentle breeze weather.

**Key words** Doppler lidar, 3DVAR, 4DVAR, wind field retrieval, result analysis

## 1 引言

晴空风与降水过程的触发和发展有着密切联系,特别是低层辐合线、切变线等与对流云的产生密切相关,是提前预报对流云发展的主要气象因子之一。另外,大型活动的气象保障如奥运会、机场的气象保障等领域对风场的精细观测都有强烈的需求。多普勒激光雷达以其高分辨率、高精度,在一定探测范围内能提供晴空条件下三维风场信息的能力,引起了世界多个国家的关注和重视。另一方面,虽然近年来采用 GPS 反射技术来遥感海洋参数,获取海面风速、风向等参数(郅秀书等,2009),但海洋上风的常规观测手段和观测资料还是非常有限,资料的时空分辨率也很低,难以满足科研和业务的多种需求,可利用激光雷达对海域边界层进行高时空分辨率扫描观测,获取海上边界层三维风场的精细结构,用于天气过程的精细预报、边界层动力结构研究、风环境监测和临近预报,对海上交通、体育活动等的气象保障有重要意义。

国内外已经发展了多套多普勒激光雷达系统,主要用来遥感风场、湍流和飞机尾涡。Darby (2002) 利用激光雷达径向风很好地揭示了离岸海风和向岸海流的流场结构特征; Reitebuch (2001) 采用了速度方位显示(VAD)方法从激光雷达观测资料获得水平平均风,并将结果与探空、风廓线雷达以及模式模拟结果作了比较; Newsom and Banta (2004a, 2004b) 将多普勒激光雷达资料四维变分同化(4DVAR)到大气边界层模式(Atmosphere Boundary Layer)研究边界层微尺度流场结构并考察了 4DVAR 同化算法同化激光雷达资料的性能。Dabas (1997) 采用变分方法从法国-德国机载红外多普勒测风激光雷达(WIND)反演三维风场,并考察了质量连续方程、边界条件以及目标函数平滑项对变分方法效果的影响; Mayor and Eloranta

(2001) 利用交叉相关法从 VIL 连续的 PPI 图像和 RHI 图像获得了时间平均的水平风场分布。在国内,胡宏伟和胡企铨(2000)对采用 Edge 技术的多普勒激光雷达系统,理论推导了圆锥四点扫描反演风廓线的 VAD 方法,刘金涛(2003)利用碘分子滤波器作为鉴频器实现了非相干脉冲激光多普勒雷达测风系统的研制,并表明激光测风雷达获得的 VAD 水平风垂直廓线与气球探空结果大体一致,中国科学院安徽光学精密机械研究所已建成了采用基于双 Fabry-Perot 标准具的测风激光雷达(王邦新等,2007),并对合肥地区对流层的径向风速进行了初步测量,中国气象科学研究所和中国海洋大学联合研制了小型可移动式非相干激光测风雷达系统,并在 2006 年的青岛国际帆船赛赛场进行了海面风场实地测量实验(盛春岩等,2007)。

国内激光雷达多用于气溶胶的探测(白宇波等,2000; 邱金桓等,2003),有关多普勒激光雷达探测风场的研究较少,仅仅利用多普勒激光雷达初步获得了 VAD 垂直风廓线,尚未见到利用多普勒激光雷达反演三维风场的研究; VAD 方法只能得到雷达探测范围内水平平均风场及其随高度的变化,变分反演方法可以反演大气三维风场的精细结构,是现代多普勒天气雷达和多普勒激光雷达趋于采用的反演技术。为了考察变分反演方法对激光雷达径向速度的反演能力,我们分别进行了多普勒激光雷达资料三维变分同化(3DVAR)、四维变分同化(4DVAR)反演风场的研究,并将这两种风场反演方法应用于 2008 年 5 月在青岛举办的残奥会测试赛中,对海面 10 m 高度处的风场进行了反演,并与海上浮标资料进行了对比。

## 2 多普勒激光雷达风场反演方法介绍

### 2.1 3DVAR 风场反演方法介绍

3DVAR 风场反演方法是 Qiu (2006) 提出的,

变分反演方法分为两步, 第一步是在低阶谱空间反演一个较为光滑的三维风场作为背景场, 第二步在格点上反演风的细致结构。反演过程是极小化如下形式的目标函数:

$$J(u, v, w) = J_B + J_m + J_E + J_C + J_p, \quad (1)$$

其中,  $u, v, w$  是需反演的风场的三个分量,  $J_B$  是背景场约束,  $J_m$  表示对观测的拟合, 下标  $m$  ( $m=1, 2$ ) 表示雷达标号,  $J_E$  是雨水含量守恒方程约束, 对于激光雷达风场反演该项为 0,  $J_C$  是连续方程约束,  $J_p$  是光滑性约束。

第一步反演背景场时将  $u, v, w$  表示为二阶勒让德多项式展开式:

$$u(x, y, z) =$$

$$\sum_{nx=0}^2 \sum_{ny=0}^2 \sum_{nz=0}^2 a_{nx, ny, nz} P_{nx}(x) Q_{ny}(y) R_{nz}(z), \quad (2)$$

其中,  $P_{nx}(x)$ 、 $Q_{ny}(y)$  和  $R_{nz}(z)$  是勒让德基函数,  $v, w$  有相似的表达式, 这时展开系数  $a$  成为反演量。在这一步中不考虑背景场约束 (即  $J_B=0$ , 取权重  $W_{ub}=W_{wb}=0$ )。第二步是在直角坐标网格上反演风场, 这时将第一步反演得到的风场作为背景风场。

## 2.2 4DVAR 反演风场方法介绍

四维变分同化反演风场的基本思路是: 将四维变分同化方法应用到三维云模式, 定义价值函数表征雷达资料与模式预报结果之间的差别, 通过极小化价值函数得到反演场, 价值函数相对模式控制变量的梯度由伴随模式求取。同化模式为一个三维云模式, 但这里不考虑云模式中的湿微物理过程, 这样云模式就简化为只包含 4 个预报方程: 3 个动量方程和热力学方程。4 个模式预报变量: 三维风场 ( $u, v, w$ ) 和位温  $\theta$ 。这里, 我们没有同化反射率因子, 主要因为: (1) 在多数情况下, 反射率因子守恒方程并不满足; (2) 一些专家的研究指出, 与多普勒径向速度相比, 增加雷达反射率因子的同化对风场反演结果影响很小。这样, 价值函数的表达式就简化为:

$$J = J_B + \sum_{\sigma, \tau, i} [\eta_v (V_{ri} - V_{ri}^{\text{ob}})^2] + J_p, \quad (3)$$

其中, 求和针对空间区域  $\sigma$ 、同化窗  $\tau$ 、序数  $i$  而言,  $\eta_v$  是径向速度的权重系数, 简单起见,  $\eta_v$  取为 1;

$V_{ri}$ 、 $V_{ri}^{\text{ob}}$  分别为预报和观测的径向速度;  $J_B$  是背景项, 它衡量的是同化窗初始时刻模式分析值与背景场之间的差别;  $J_p$  是罚项, 也称时空平滑项, 罚项可以减少“噪音”, 加快价值函数极小化收敛速度, 保持同化的稳定性。Sun and Crook (1997) 对算法做了具体描述, 在此就不再赘述。

文中将激光雷达径向速度插值到笛卡儿坐标系下进行 4DVAR 风场反演, 文中加入的背景场为大气平均场, 将激光雷达观测范围内浮标的风向、风速分解为  $u, v$  分量后采用对数风廓线公式 (见 2.3 节), 订正到不同高度层作为不同高度层的大气平均风场。

## 2.3 风场订正到海面 10 m 高度处的水平风场

由于在残奥会测试赛中需要提供的是海面 10 m 处的风场分布, 文中将 3DVAR、4DVAR 反演风场的最低层风场订正到海面 10 m 处。

大气边界层一般分为两层, 即近地面层和埃克曼层。在近地面层, 按对数定律, 取风速垂直分布为 (廖木星, 2003):

$$V_z = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \frac{z}{z_0} - \psi \left( \frac{z}{l} \right) \right], \quad (4)$$

其中,  $V_z$  是  $z$  高度上的风速;  $u_*$  是摩擦速度;  $k$  是 von Karman 常数, 常取 0.4;  $z_0$  是海面粗糙度;  $\psi(z/l)$  是稳定度订正函数, 为  $z/l$  的函数;  $l$  是 Monin-Obukhov 长度。

通常情况, 不知道稳定条件的话, 可以取中性稳定条件下计算, 此时  $\psi(z/l)=0$ , 此时就是严格的对数风廓线, 知道  $z$  高度的风速, 则 10 m 处的风速为

$$V_{10} = V_z \frac{\ln 10 - \ln z_0}{\ln z - \ln z_0}, \quad (5)$$

其中,  $z_0$  的取值与海面风速有关 (张淮水等, 1989), 文中对风速小于 5 m/s 时,  $z_0=0.001$  m, 风速在 5~15 m/s 之间时,  $z_0=0.003$  m, 风速大于 15 m/s 时,  $z_0=0.005$  m。

## 3 多普勒激光雷达资料预处理及分析

2008 年 5 月 10~15 日在青岛举行了残奥会测试赛, 在此期间, 中国气象科学研究院和中国海洋大学联合研制的车载非相干多普勒激光雷达为残奥会测试赛提供了气象服务。本文采用的激光雷达数

据来源于此次过程。刘智深等(2001)和刘金涛等(2003)对非相干多普勒激光雷达测风原理进行了详细描述,这里不再赘述。激光雷达观测地点为(36.052°N, 120.396°E),为使扫描尽可能接近海面,扫描模式为单仰角扫描,扫描仰角为1°。扫描范围为覆盖了A、B赛区(图中以I、II表示)的一个扇面,切向分辨率为2°,径向分辨率为10 m,在能见度比较好的晴天,测量半径为5 km左右。

### 3.1 资料预处理

为了减小径向速度噪声的影响,我们对激光雷达径向速度在切向、径向上进行 $3\times 3$ 、 $3\times 5$ 、 $3\times 15$ 、 $3\times 25$ 的滑动平均,图1为激光雷达2008年5月10日14:56(北京时,下同)的一个径向上径向速度原始数据及预处理后的对比,从图1可以看出,原始径向速度沿径向存在明显的径向速度库间脉动,采用 $3\times 3$ 、 $3\times 5$ 、 $3\times 15$ 、 $3\times 25$ 的滑动平均都能消除这种脉动,而 $3\times 3$ 的滑动平均在个别库上存在毛刺, $3\times 5$ 、 $3\times 15$ 滑动平均后差异很小,几乎重合,并能保持拐点处的大梯度特征, $3\times 25$ 的滑动平均在a点过于平滑,为了有效保留径向速

度的特征信息,文中采用的预处理方法为 $3\times 5$ 的滑动平均。

### 3.2 多普勒激光雷达数据分析

雷达资料的质量取决于雷达的发射和接收性能、雷达系统的精确定标等过程。为了在风场反演时采用比较可靠、合理的雷达数据,我们对获取的

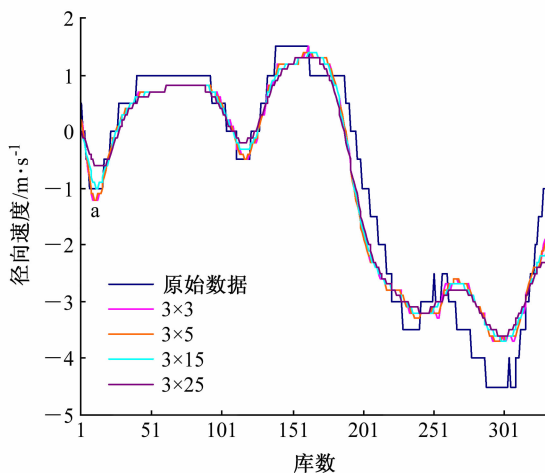


图1 径向速度预处理对比分析

Fig. 1 Pretreatment contrast of radial velocity

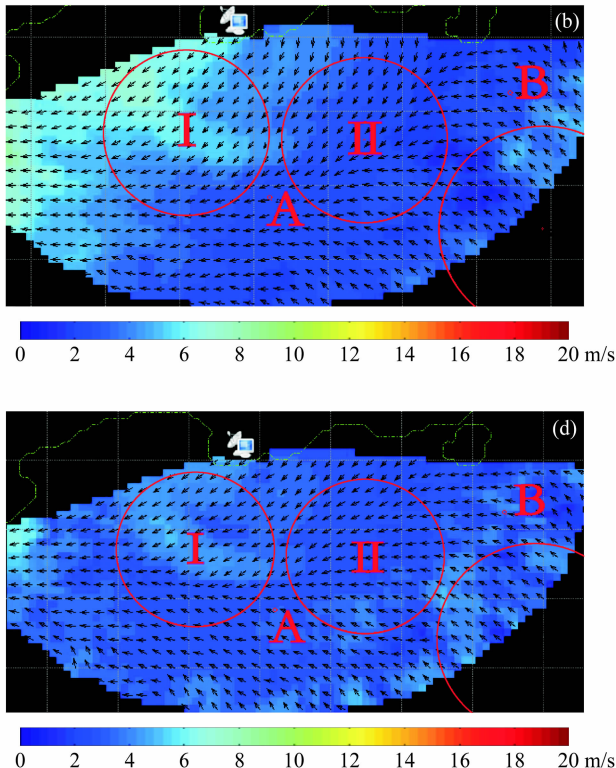
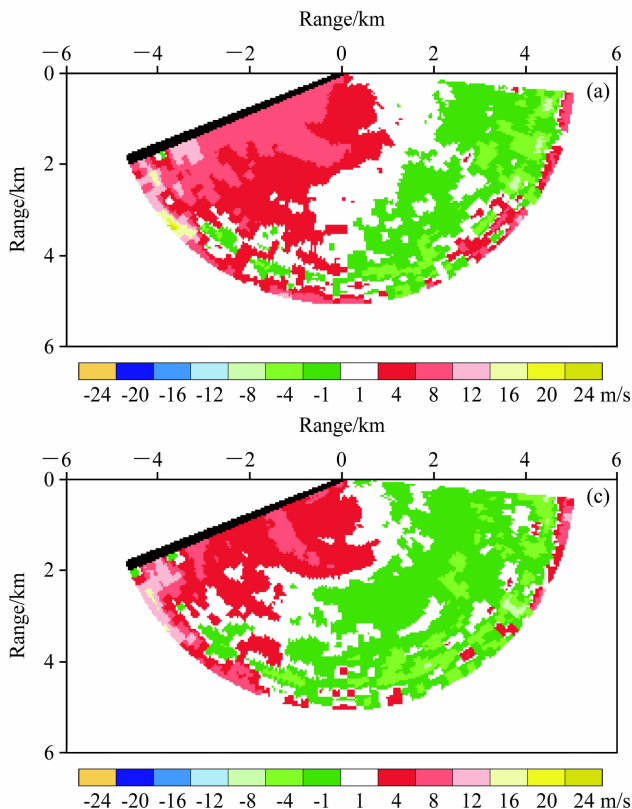


图2 2008年5月10日激光雷达径向速度(a、c)及3DVAR风场反演结果(b、d):(a、b) 15:05;(c、d) 15:35

Fig. 2 (a, c) Lidar radial velocity and (b, d) wind field retrieved with 3DVAR on 10 May 2008: (a, b) 15:05; (c, d) 15:35

激光雷达数据进行了以下分析:

(1) 通过前后资料对比,某一次或几次径向速度值存在明显的跳变,认为这种情况很可能是雷达信号处理单元处理有误,对这种资料进行了剔除,在文中没有进行风场反演。

(2) 将能探测到的浮标站资料转换成径向速度,与激光雷达在浮标站位置的径向速度进行对比,如果差异过大,认为这种情况可能是雷达定标不准,这种资料在文中也没有进行风场反演。

通过这两种方法剔除掉一些不确定的观测数据,这些数据占观测数据的 6% 左右。

## 4 风场反演结果及分析

我们采用了 3DVAR 和 4DVAR 两种方法对激光雷达资料进行了风场反演,并对反演结果与激光雷达能探测到的浮标的数据资料进行了对比。

### 4.1 3DVAR 风场反演结果

图 2 为 2008 年 5 月 10 日两个时次激光雷达的径向速度图及 3DVAR 反演的风场分布,图中箭头表示风场的方向,颜色表示风速。从激光雷达径向速度图(图 2a、c)可以看出,右下角为东南风,左上角为东北风,反演的风场与径向速度图一致。从反演的风场分布图(图 2b、d)可以看到:在 15:05,浮标 A(图中 A 位置)、浮标 B(图中 B 位置)位置的风向均为东风,在 15:35,浮标 A 处转为东南风,浮标 B 处仍为东风。图 3 给出了 2008 年 5 月 10 日浮标站的风向、风速随时间的变化[浮标 A ( $36^{\circ}02.27'N$ ,  $120^{\circ}24.61'E$ ), 浮标 B ( $36^{\circ}03.06'N$ ,  $120^{\circ}26.586'E$ ), 浮标 C ( $36^{\circ}0.977'N$ ,  $120^{\circ}26.41'E$ ), 浮标 D ( $36^{\circ}01'N$ ,  $120^{\circ}27'E$ )]. 对照图 3 可以看到,在 15:05,浮标 A、B 的风向也是东风,到 15:30 时,浮标 A 由东风转为东南风,浮标 B 仍为东风。

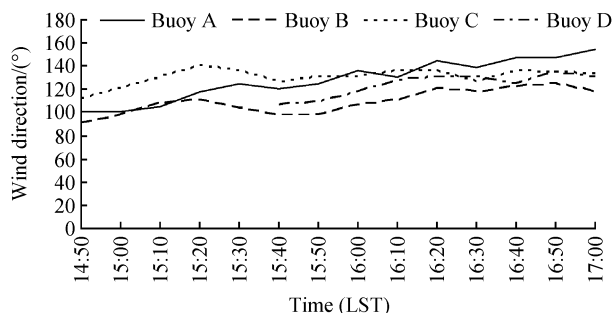


图 3 2008 年 5 月 10 日浮标风向随时间的变化

Fig. 3 Change of buoy wind direction with time on 10 May 2008

由以上的分析可以看出,3DVAR 反演的风场与激光雷达径向速度一致,在浮标 A、B 的位置,与浮标测得的 10 min 平均风向具有较好的一致性,并能反映出风向随时间的变化。

图 4 为 2008 年 5 月 12 日两个时次的激光雷达径向速度图和 3DVAR 反演的风场分布,3DVAR 反演的风向为西北风,与径向速度图相符。从图 4a 的风场分布可以看出,在 10:43,在浮标 A 位置,风向为西北偏西方向,从浮标 A 的资料可以得到该点的风向为  $294^{\circ}$ ,在浮标 B 位置,风向为西北方向,从浮标 B 的资料可以得到该点的风向为  $308^{\circ}$ ,反演和浮标的风向一致性很好。从图 4a 的风场分布还可以看到,浮标 B 位置的风速大于浮标 A 位置的风速,但从浮标资料来看,这两个位置的风速基本相同,反演的风速与浮标资料有一些差异,针对这种差异,我们将浮标 B 的风速根据对数风廓线公式换算到激光雷达在浮标 B 位置的测量高度上的风速,并转换成径向速度,与激光雷达在浮标 B 位置的径向速度进行了比较,发现激光雷达在浮标 B 位置测量的径向速度 ( $9.4 \text{ m/s}$ ) 比浮标 B 的风向、风速转换的径向速度 ( $7.5 \text{ m/s}$ ) 大了 25%;从图 4b 的风场分布可以看出在 15:17,在浮标 A、B 位置,风向均为西北方向,从浮标 A、B 资料显示的风向分别为  $312^{\circ}$ 、 $309^{\circ}$ ,风向的一致性很好。从图 4b 的风场分布还可以看到,浮标 B 位置的风速大于浮标 A 位置的风速,从浮标资料来看,也是浮标 B ( $8.2 \text{ m/s}$ ) 的风速大于浮标 A ( $6.3 \text{ m/s}$ ) 的风速,这与 3DVAR 风场反演相一致。

### 4.2 4DVAR 风场反演结果

许小永等(2004)的研究表明:背景场可以改善和弥补资料缺值对同化反演的负面影响。因此,4DVAR 同化反演风场时,以浮标资料作为背景场,同时由于浮标 B 位于激光雷达探测范围的边缘,因此文中选择浮标 A 数据作为四维变分同化反演的背景场。由于浮标 A 的数据是滞后 1 小时传输到青岛市气象局,因此,对 4DVAR 同化反演风场分为两种情况,第一,以邻近时刻浮标资料作为背景场同化反演风场;第二,以前 1 小时浮标资料为背景场同化反演风场。

4.2.1 以邻近时刻浮标资料作为背景场的风场反演结果

图 5 为 2008 年 5 月 10 日两个时次 4DVAR 反

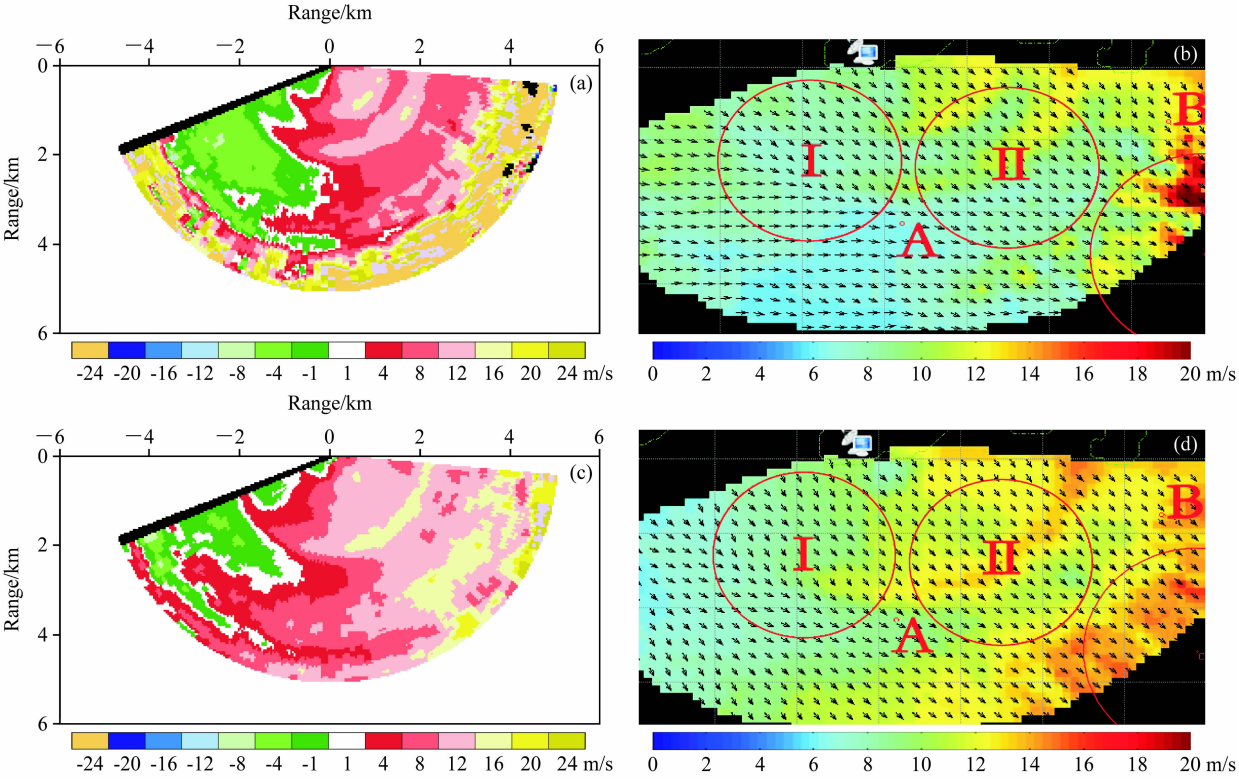


图4 同图2, 但为2008年5月12日: (a、b) 10:43; (c、d) 15:17  
Fig. 4 Same as Fig. 2, but on 12 May 2008: (a, b) 10:43; (c, d) 15:17

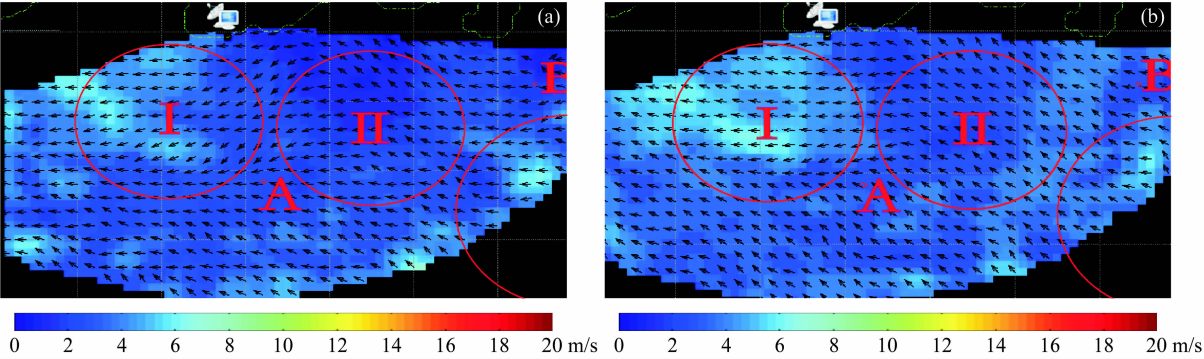


图5 2008年5月10日4DVAR风场反演结果: (a) 15:05; (b) 15:35  
Fig. 5 Wind field retrieved with 4DVAR on 10 May 2008: (a) 15:05; (b) 15:35

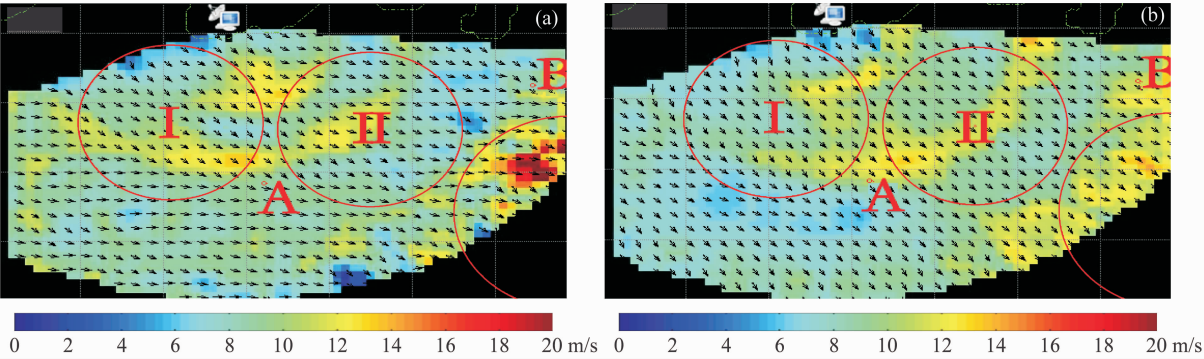


图6 2008年5月12日4DVAR反演的风场分布: (a) 10:43; (b) 15:17  
Fig. 6 Wind field retrieved with 4DVAR on 12 May 2008: (a) 10:43; (b) 15:17

演的风场分布,图中箭头表示风场的方向,颜色表示风速。对比图 5 和图 3 可以看出,图 5 中的两个时刻,4DVAR 反演的风场在浮标 A、B 位置的风向与浮标 A、B 的风向一致性也很好,并能反映出风向随时间的变化。对比 2008 年 5 月 10 日 3DVAR (图 2)、4DVAR 反演的风场 (图 5),可以看出,风场的分布在距离激光雷达较远的地方 (约 2 km 以外),风向比较一致,为东风或东南风,但在 A、B 赛区,风向存在较大的差异,3DVAR 反演的风场在 A、B 赛区的北半部为东北风,南半部为东南风,而 4DVAR 反演的风场在 A 赛区主要为东风, B 赛区以东南风为主。针对这种差异,我们将 4DVAR 中速度场的初始值设为 0,结果发现在 A 赛区主要为东北风,与三维变分反演风场结果一致,但 B 赛区仍以东南风为主。通过分析激光雷达的径向速度分布图 (见图 2),可以看到,在 B 赛区的位置,正好是零速度线所在的位置,风速很小,给风场反演带来了一些不确定的因素。虽然在 A、B 赛区没有海上测风仪器,但从图 3 可以看到,5 月 10 日浮标 A、B、C、D 四个站的测风数据均为东风或东南风,因此我们认为 4DVAR 风场反演结果更合理一些。

图 6 为 2008 年 5 月 12 日两个时次 4DVAR 反演的风场分布,从图 6 中的两个时刻来看,4DVAR 反演的风场在浮标 A 和 B 位置的风向均为西北风,与浮标 A 和 B 的风向一致性很好。从图 6a 可以看到,浮标 B 位置的风速大于浮标 A 位置的风速,但从浮标资料来看,这两个位置的风速基本相同,原因也是激光雷达在浮标 B 位置测量值大于浮标测量值;从图 4b 还可以看到,浮标 B 位置的风速大于浮标 A 位置的风速,从浮标资料来看,也是浮标 B (8.2 m/s) 的风速大于浮标 A (6.3 m/s) 的风速。对比 2008 年 5 月 12 日 3DVAR (图 4)、4DVAR (图 6) 反演的风场,可以看出风向的一致性非常好,在 10:43,4DVAR 反演的风场在浮标 A 以南主要为西风,以北主要为西北风,在 15:17,4DVAR 反演的风场在反演区域均为西北风,我们在 3DVAR 反演的风场可以看到相同的分布。4DVAR 反演的风场东部的风速大于西部,这种分布与 3DVAR 一致,但 3DVAR 东部风场的风速大于 4DVAR 风场东部的风速。

从以上两天的 3DVAR、4DVAR 反演风场分

析以及其它几天的分析,可以看出 3DVAR、4DVAR 反演风场与浮标数据基本一致,但也有不一致的情况;在风速较大的天气情况,3DVAR 与 4DVAR 反演风场的一致性要好于风速较小的天气情况。

#### 4.2.2 以前 1 小时浮标资料为背景场的风场反演结果

以前 1 小时浮标资料为背景场进行 4DVAR 风场反演,反演的风场在浮标 A、B 位置的风向与浮标 A、B 观测的风向一致性很好,也能反映出风向随时间的变化。对比分析以前 1 小时浮标资料为背景场的风场反演结果与以邻近时刻浮标资料为背景场的风场反演结果,发现两者之间存在一些差异,但差异不大,这种差异与风向、风速的时间变化情况成正相关,总的来说,风向的差异小于风速的差异,4.3 节给出了两者之间的定量对比分析。

### 4.3 风场反演结果对比分析

由于能够提供海风信息的实测数据只有浮标资料,为了检验风场反演结果的稳定性,我们以浮标资料作为参考,对风场反演结果进行时间序列上的对比分析。同时,由于激光雷达能够扫描范围受天气影响较大,在能见度较低的情况下,浮标 B 位置探测不到,因此,文中只将浮标 A 的位置作为数据对比的位置。为简便起见,文中以  $D_A$  表示浮标 A 的数据,  $D_{3A}$  表示 3DVAR 反演风场在浮标 A 处的数据,  $D_{4A}$  表示以邻近时刻浮标资料为背景场的 4DVAR 反演风场在浮标 A 处的数据,  $D_{4A'}$  表示以前一小时浮标资料为背景场的 4DVAR 反演风场在浮标 A 处的数据。

#### 4.3.1 反演风场的风向、风速与浮标 A 的风向、风速随时间的变化

由于篇幅所限,图 7 给出了 5 月 10 日及 5 月 12 日  $D_{3A}$ 、 $D_{4A}$ 、 $D_{4A'}$  与  $D_A$  随时间的变化情况,可以看出,5 月 10 日及 5 月 12 日  $D_{3A}$ 、 $D_{4A}$ 、 $D_{4A'}$  的风向与  $D_A$  的风向随时间变化一致性比较好。5 月 10 日风速在 16:38 以前一致性比较好,16:38 之后  $D_{3A}$ 、 $D_{4A}$ 、 $D_{4A'}$  的风速大于  $D_A$  风速,但  $D_{4A}$  与  $D_A$  风速比较接近;5 月 12 日  $D_{4A}$  的风速随时间变化比较平滑,但略高于  $D_A$  的,  $D_{4A'}$  与  $D_{4A}$  风速随时间变化的趋势基本一致,但不如  $D_{4A}$  平滑,  $D_{3A}$  风速随时间变化较大,与  $D_A$  存在一定差异。针对这些差异,我们将浮标 A 的风速根据对数风廓线公式订正

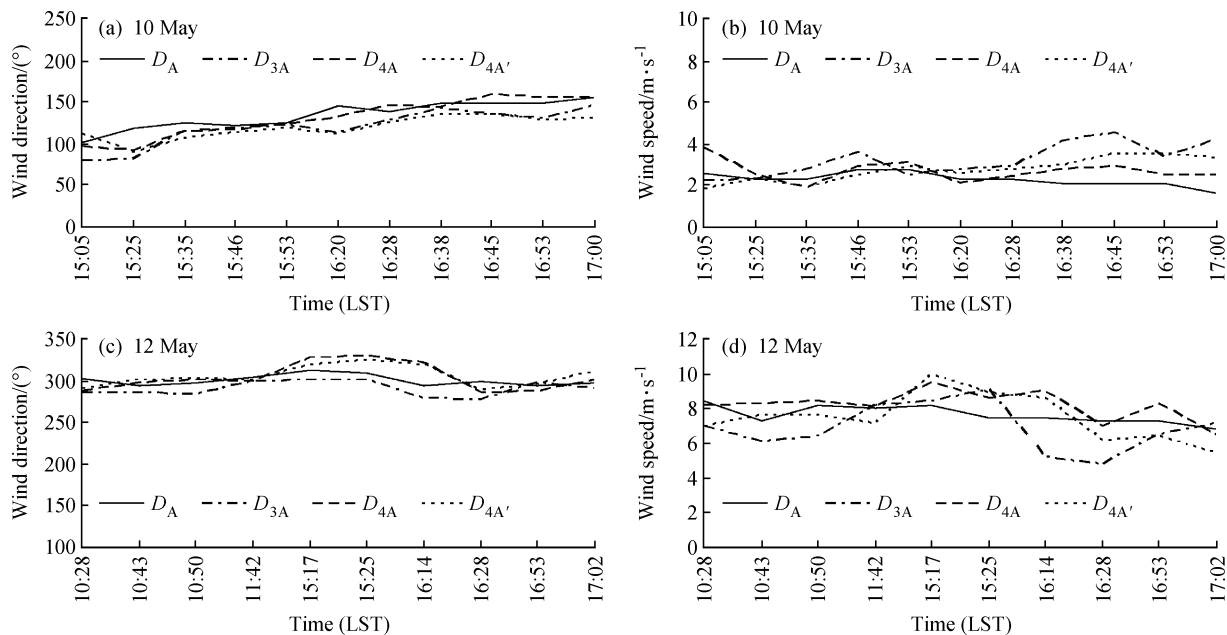


图 7 反演风场的风向、风速与浮标 A 的风向、风速随时间的变化

Fig. 7 Change of wind direction (speed) from 3DVAR, 4DVAR, buoy A with time

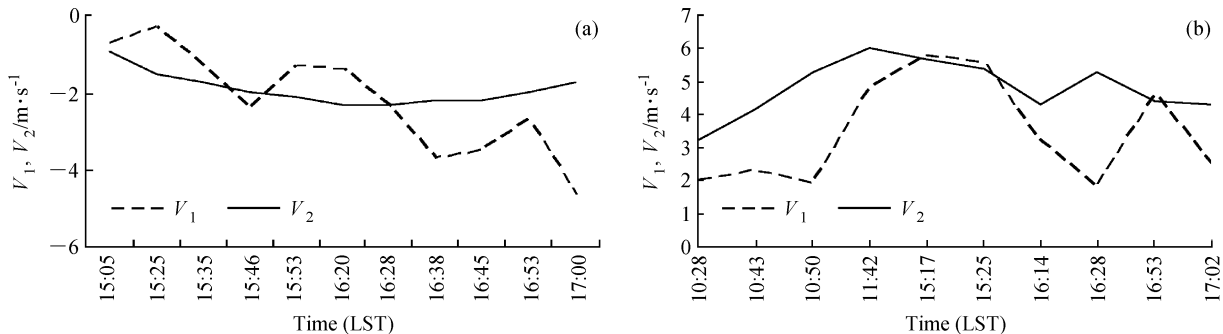


图 8 激光雷达径向速度与浮标资料对比: (a) 5月10日; (b) 5月12日

Fig. 8 Radial velocity contrast between lidar and buoy: (a) 10 May; (b) 12 May

到激光雷达在浮标 A 位置的探测高度上,再转换成径向速度,与激光雷达在浮标 A 位置的径向速度进行了对比。如图 8a 所示,图中  $V_1$  代表激光雷达在浮标 A 位置的径向速度,  $V_2$  代表浮标 A 的数据转换成的径向速度。可以看出,  $V_2$  随时间变化比较平滑,  $V_1$  随时间的变化存在时次间脉动,但在 16:38 之前,  $V_1$  与  $V_2$  差异不大, 16:38 之后,  $V_1$  明显大于  $V_2$ , 这可能就是 16:38 之后  $D_{3A}$ 、 $D_{4A}$ 、 $D_{4A'}$  的风速大于  $D_A$  风速的原因。从图 8b 可以看出, 在 5 月 12 日, 激光雷达数据低于浮标数据, 3DVAR 反演的风速也要低于浮标风速, 且与激光雷达径向速度随时间的变化趋势一致。

从以上的分析可以看到, 多普勒激光雷达测量

风场和浮标测量之间由于测量原理、采样体积及采样频率等的不同, 在测量数据上还存在一定的差异, 4DVAR 反演方法由于以浮标数据作为背景场, 反演的风场较 3DVAR 反演的风场更接近于浮标数据, 在浮标资料的选择上, 以邻近时刻的浮标资料作为 4DVAR 的背景场为更好。

#### 4.3.2 风场反演结果定量分析

记  $F_i$  为风场反演值,  $O_i$  为浮标观测值,  $N$  为反演次数, 文中计算的统计量有:

##### (1) 相关系数

$$c_{or} = \frac{\sum (F_i - \bar{F}) (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (6)$$

表 1 反演结果的均方根误差  
Table 1 Root mean square errors of the retrieval results

	$D_{3A}$		$D_{4A}$		$D_{4A'}$	
	风向/(°)	风速/m·s <sup>-1</sup>	风向/(°)	风速/m·s <sup>-1</sup>	风向/(°)	风速/m·s <sup>-1</sup>
5 月 10 日	18.25	1.35	10.52	0.59	19.08	0.90
5 月 11 日	35.25	2.90	26.03	1.27	33.79	2.30
5 月 12 日	11.89	1.47	13.84	0.86	12.26	1.17
5 月 13 日	21.02	2.83	15.22	2.04	19.93	2.59
5 月 14 日	30.81	1.32	18.03	0.73	24.17	2.06
平均	23.44	1.97	16.73	1.01	21.85	1.80

表 2 反演结果的平均绝对误差  
Table 2 Mean absolute errors of the retrieval results

	$D_{3A}$		$D_{4A}$		$D_{4A'}$	
	风向/(°)	风速/m·s <sup>-1</sup>	风向/(°)	风速/m·s <sup>-1</sup>	风向/(°)	风速/m·s <sup>-1</sup>
5 月 10 日	14.71	1.04	8.05	0.48	11.13	0.44
5 月 11 日	28.69	2.23	23.53	0.99	30.84	1.74
5 月 12 日	10.55	1.23	11.48	0.70	10.34	1.09
5 月 13 日	16.81	1.36	13.20	1.57	14.77	1.91
5 月 14 日	20.95	1.08	12.55	0.59	17.63	0.71
平均	18.34	1.39	13.76	0.87	16.94	1.18

(2) 均方根误差

$$S_{RM} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}, \tag{7}$$

(3) 平均绝对误差

$$m_{ac} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|. \tag{8}$$

以上检验统计量中，均方根误差、平均绝对误差越接近 0 越好，相关系数越接近于 1 越好。 $D_{3A}$  的风向与  $D_A$  风向的相关系数为 0.89， $D_{4A}$  的风向与  $D_A$  风向的相关系数为 0.98， $D_{4A}$  的风向与  $D_A$  风向的相关系数为 0.97，说明反演风场的风向与浮标风向具有很好的相关关系； $D_{3A}$  的风速与  $D_A$  风速的相关系数为 0.67， $D_{4A}$  的风速与  $D_A$  风速的相关系数为 0.75， $D_{4A'}$  风速与  $D_A$  风速的相关系数为 0.69，说明反演风场的风速与浮标风速有一定的相关关系， $D_{4A}$  的风速与  $D_A$  风速的相关程度好于  $D_{3A}$  和  $D_{4A'}$ ，这与前面的分析是吻合的，从均方根误差（表 1）和平均绝对误差（表 2）也证实了这一点。

从表 1 和表 2 可以看出，风向的平均均方根误差和平均绝对误差在 20°左右，表明反演风场的风向与浮标风向之间存在一定的偏差，但对于风向来

说，这种偏差是可以接受的；风速的平均均方根误差在 2 m/s 左右，平均绝对误差在 1 m/s 左右，表明反演风速的风向与浮标风速之间也存在一定差别，这种差别在风速较小的天气情况下，要引起注意。从表 1 和表 2 还可以看到，5 月 11 日和 14 日反演的风向与浮标风向的均方根误差和平均绝对误差比较大，根据浮标数据，这两天的风向为东南偏东风，这对于激光雷达测量径向速度是不利的，这也是这两天反演风向与浮标风向的均方根误差和平均绝对误差比较大的原因。

5 结论和讨论

激光雷达风场反演对于大型体育活动和机场的气象保障等方面的应用具有非常重要的意义。本文采用 3DVAR、4DVAR 方法进行了激光雷达风场反演的方法研究，利用 2008 年残奥会测试赛期间车载多普勒激光雷达的外场试验数据进行了风场反演结果的对比分析，分析表明：

(1) 3DVAR、4DVAR 风场反演方法均能实现近海面风的精细化风场反演，并能反映出风向的变化，反演风场与浮标数据基本一致，在风速较大的天气情况，3DVAR 与 4DVAR 反演风场的一致性

要好于风速较小的天气情况。

(2) 由于 4DVAR 反演方法中以浮标资料作为背景场, 使得其与浮标的符合程度要好于 3DVAR 方法反演风场, 而在浮标资料的选择上, 以邻近时刻的浮标资料作为 4DVAR 的背景场为更好。

(3) 统计结果表明, 反演风场的风向与浮标风向具有很好的相关关系, 反演风场的风速与浮标风速具有一定的相关关系, 反演风场的风向、风速与浮标的风向、风速之间平均均方根误差和平均绝对误差表明, 这两序列之间具有一定差别, 在风速较小的天气情况下使用时需要注意。

(4) 多普勒激光雷达测量径向风和浮标测量海面风之间由于测量原理、采样体积及采样频率等的不同, 在测量数据上还存在一定的差异, 这是风场反演结果与浮标数据之间存在差异的一个主要原因。

由于激光雷达外场试验资料还比较有限, 海上浮标比较稀疏, 本研究只是初步的, 为了进一步研究激光雷达风场反演方法及结果, 我们将继续收集激光雷达外场试验数据, 进行激光雷达风场反演方法的研究和结果分析。

**致谢** 文中三维变分反演风场模块由兰州大学完成, 所用的浮标资料由青岛市气象局提供, 特此致谢。

## 参考文献 (References)

白宇波, 石广玉, 田村耕一, 等. 2000. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测 [J]. 大气科学, 24 (4): 559–567. Bai Yubo, Shi Guangyu, Koichi Tamura, et al. Lidar observations of atmospheric aerosol optical properties over Lhasa [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 559–567.

Dabas A, Périn J, Flamant P H. 1997. Variational analysis for airborne conically scanned Doppler lidar to retrieve mesoscale wind fields [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 14: 1079–1090.

Darby L S, Banta R M, Pielke R A. 2002. Comparisons between mesoscale model terrain sensitivity studies and Doppler lidar measurements of the sea breeze at monterey bay [J]. Mon. Wea. Rev., 130: 2813–2837.

胡宏伟, 胡企铨. 2000. 激光雷达对大气风场的光束扫描及风场反演 [J]. 应用激光, 20 (5): 213–215. Hu Hongwei, Hu Qiquan. 2000. The scanning and inversion method of atmosphere wind by Doppler lidar [J]. Applied Laser (in Chinese), 20 (5): 213–215.

廖木星. 2003. 海面风场预报的技术研究报告 [J]. 青岛远洋船员学院学报, 24 (2): 6–10. Liao Muxing. 2003. Technical research on sea surface wind field forecast [J]. Journal of Qingdao

Ocean Shipping Mariners College (in Chinese), 24 (2): 6–10.

刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 2003. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究 [J]. 大气科学, 27 (1): 115–122. Liu Jintao, Chen Weibiao, Liu Zhishen. 2003. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 115–122.

刘智深, 宋小全, 刘金涛, 等. 2001. 非相干脉冲激光多普勒雷达测速系统 [J]. 科学通报, 46 (24): 2080–2085. Liu Zhishen, Song Xiaoquan, Liu Jintao, et al. 2001. Incoherent pulse Doppler lidar as velocimeter system [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 46 (24): 2080–2085.

Mayor S D, Eloranta E W. 2001. Two-dimensional vector wind fields from volume imaging lidar data [J]. J. Appl. Meteor., 40: 1331–1346.

Newsom R K, Banta R M. 2004a. Assimilating coherent Doppler lidar measurements into a model of the atmospheric boundary layer. Part I: Algorithm development and sensitivity to measurement error [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 21: 1328–1345.

Newsom R K, Banta R M. 2004b. Assimilating coherent Doppler lidar measurements into a model of the atmospheric boundary layer. Part II: Sensitivity analyses [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 21: 1809–1824.

邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 2003. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测 [J]. 大气科学, 27 (1): 1–7. Qiu Jinhuan, Zheng Siping, Huang Qirong, et al. 2003. Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 1–7.

郗秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2008. 大气探测高技术及应用研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 867–881. Qie Xiushu, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 867–881.

Qiu C J, Shao A M, Liu S S, et al. 2006. A two-step variational method for three-dimensional wind retrieval from single Doppler radar [J]. Meteor. Atmos. Phys., 91: 1–8.

Reitebuch O, Werner C, Leike I, et al. 2001. Experimental validation of wind profiling performed by the airborne 10- $\mu\text{m}$  heterodyne Doppler lidar WIND [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18: 1331–1344.

盛春岩, 王建林, 刁秀广. 2007. 2006 年 8 月青岛国际帆船赛期间海陆风特征及三维结构分析 [J]. 中国海洋大学学报, 37 (4): 609–614. Sheng Chunyan, Wang Jianlin, Diao Xiuguang. 2007. The features and three-dimensional structures of sea and land breeze during the Qingdao 2006 International Regatta [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 37 (4): 609–614.

Sun J, Crook N A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its ad-

- joint. Part I: Model development and simulated data experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54: 1642–1661.
- 王邦新, 孙东松, 钟志庆, 等. 2007. 多普勒测风激光雷达数据处理方法分析 [J]. *红外与激光工程*, 36 (3): 373–376. Wang Bangxin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. 2007. Analysis of data processing method for Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering (in Chinese)*, 36 (3): 373–376.
- 许小永, 郑国光, 刘黎平. 2004. 多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演的模拟研究 [J]. *气象学报*, 62 (4): 410–422. Xu Xiaoyong, Zheng Guoguang, Liu Liping. 2004. Dynamical and microphysical retrieval from simulated Doppler radar observations using the 4DVAR assimilation technique [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 62 (4): 410–422.
- 张淮水, 刘安国, 宋珊, 等. 1989. 海面风的特征分析 [J]. *青岛海洋大学学报*, 19 (2): 48–54. Zhang Huaishui, Liu Anguo, Song Shan. 1989. The analysis of the wind characteristics over the sea surface [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao (in Chinese)*, 19 (2): 48–54.