

基于风廓线网的散度和涡度计算

刘梦娟 杨引明

(上海市气象局, 上海 200030)

摘要: 近年来风廓线雷达在全国范围内的建设为预报员提供了更高时空分辨率的实时风场观测资料, 介绍了从风廓线网计算水平散度和涡度的三点法的基本原理、算法及两种三点法的等价性。根据上海地区风廓线网中尺度特性, 对梅雨期间一次过程进行计算, 并与不同资料和差分方法进行了比较, 以考察利用风廓线网分析中尺度系统结构的能力。结果表明, 在边界层内存在明显正涡度区与负散度区, 与此期间发生的降水相配合, 误差小于差分方法。

关键词: 风廓线, 散度, 涡度, 三点法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.004

Calculation of Horizontal Divergence and Vorticity Using Wind Profiler Network

Liu Mengjuan, Yang Yinming

(Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030)

Abstract: According to the development of wind profiler throughout the country, which provides real time wind observation with higher spatial-temporal resolution for forecasters, we introduce two triangle methods and their equivalence for determining horizontal divergence and vorticity. Since Shanghai wind profiler network is in mesoscale observation network, the diagnosing ability of mesoscale system by using wind profiler network was investigated for a real weather case on Jun. 21, 2014, and the results from different methods were compared. It shows that the two methods obtain a better result that appears distinct areas of positive vorticity and negative divergence a companing with the heavy precipitation at that time.

Key words: wind profiler, divergence, vorticity, fitting method

0 引言

大气水平辐合辐散及其垂直分布与垂直运动紧密相关。在降水的形成和发展过程中, 垂直运动条件是三大条件之一, 其中暴雨, 尤其特大暴雨, 都与中小天气系统造成的强烈上升运动密不可分。另一方面, 由于地球的自转, 大气运动最常见的形式是涡旋运动。从涡度方程可知, 散度是引起涡度个别变化的原因。因此, 涡度和散度又是两个相互紧密联系的物理量。在准地转动力学理论中, 涡度平流是两个基本的动力因子之一, 它不仅与天气系统的移动和发展相联系, 也是产生垂直运动的因子之一。在诊断分析中, 涡度和散度也是最常用的物理量。

客观计算散度与涡度的方法研究大致可以分为四个阶段, 最早从气压场上等高线的分布, 根据地转关

系推测风的分布, 从而推断涡度场。但地转风的散度恒等于0, 故不能从高度场计算散度, 为此, 提出了从实测风计算散度和涡度的三点法, 如三角形法^[1]、线性积分法^[2]、有限元法^[3]和线性矢量法 (linear vector point function, LVPF)^[4]等。此类方法仅需三个不共线的测风观测即可求出散度与涡度值。之后随着数值模式发展, 散度与涡度的计算增加了网格的客观分析法, 即先将实测风插值到规则的网格点上, 然后计算格点风场的涡度与散度^[5]。随着计算技术的进步, 研究大范围涡度散度时, 客观分析法逐渐取代了低阶拟合方法。由于散度比涡度小一个数量级 (对于天气尺度而言), 散度值对风的偏差十分敏感, 所以在客观诊断分析中的散度必须按质量补偿原理进行订正才能使用^[6]。由于人工插值本身会降低资料精度, 因此当观测网中站点较少, 组网范围较小时, 三点法可避免人工插值带来的误差, 以提供小范围的最优涡度与散度估计^[7]。

早期的散度与涡度计算主要针对相隔距离较远 (数百千米) 的探空观测资料, 所以研究对象是天气

收稿日期: 2015年9月19日; 修回日期: 2016年3月9日
第一作者: 刘梦娟 (1987—), Email:mengjuan.liu@gmail.com
通信作者: 杨引明 (1972—), Email:yymyang@pku.org.cn
资助信息: 国家自然科学基金资助项目 (41475040); 上海市气象局科技开发项目 (QM201602)

尺度上散度、涡度的分布与变化。美国自20世纪80年代开始建设风廓线网络，并迅速开展了利用风廓线计算散度与涡度的研究。由于风廓线组网具备组网范围较小、站点数量少和间距小等特点，三点法相较其他两种类型的方法更适用于风廓线组网内局地小范围的涡度、散度计算。因此许多学者选择用三点法分析美国风廓线组网区域的涡度、散度及其与天气系统间的关系^[4,8]。

随着计算机在我国的普及，20世纪80年代开始，国内学者引进了三角形法来计算我国各个探空站点的涡度、散度等量^[9-10]，并基于原始方法提出了各种改进方案：将平面坐标下三角形转换到球面坐标下三角形^[11-13]；将三角形法扩展到任意多边形上^[14]；用邻近三角形加权平均的方法来计算观测点上的散度^[12]；还有研究人员指出三角形法及其他三点法本身存在缺陷，如线性风场假设^[15]，由于面积和形状的不同带来的误差等^[16]。

国内与国外方法的核心相同，并有越来越繁琐的趋势，但实际效果并无明显改善，因而2000年以后低阶拟合法计算散度涡度等物理量的研究工作逐渐停止，一些学者将注意力转移到利用多普勒雷达的径向风信息来提取散度信息，如从单部多普勒雷达测得的径向速度随方位分布中反演风矢量场的VAP（Velocity Azimuth Processing）法^[17]、极坐标散度反演法^[18]、推广速度方位显示方法（Extended Velocity Azimuth Display，简称EVAD）^[19]和图像识别方法技术^[20]等。而多普勒雷达的径向风场仅提供风矢量的一个分量的信息，不能替代风廓线雷达二维风矢量信息的独特性。

随着全国各地风廓线雷达组网的建立与完善，越来越多地方预报员可以得到时空分辨率均高于探空的组网风场。北京市气象局已建成4部风廓线雷达，并投入业务化使用^[21]。上海市气象局在2011年基本完成了全市风廓线雷达的布点和组网，目前共有10台边界层风廓线雷达在业务运行^[22]。上海风廓线雷达网具有较高的时空分辨率：站间距20~40km，时间间距6min/次瞬时风，30min/次平均风。由于其廓线雷达垂直向上，不随时间漂移，可以避免球面坐标和观测位置漂移带来的误差。在不到200km范围内有10部风廓线雷达组成的网具有典型的中尺度观测网的性质，具有分辨50~200km大小的中尺度系统结构的能力。在国内外尚未见到有类似的风廓线网。

当前国内对于风廓线资料水平风的应用，大部分仍停留在对单部廓线资料的分析：从垂直方向上风向

风速分布的不连续性来考察大气的多层结构，如探测低空急流等；从风廓线时间序列的变化揭示次天气尺度系统的活动和推断温度平流^[23,24]。

若将散度和涡度计算用到风廓线网，预报员可以实时监测局地散度与涡度及其变化，对当前天气系统的诊断分析和未来天气过程的预报提供了更丰富的动力学信息，为短时临近预报，尤其是强降水预报准确率的提升提供新的可能性。

本文首先介绍两种最常用的三点法：三角形法与有限元法，并证明其等价性；然后给出三点法应用于上海风廓线网资料的示例，并与网格差分的方法进行比较与讨论。

1 方法

1.1 三点法

20世纪涌现出了许多种利用三个不共线站点风速观测计算散度的三点法，如三角形法^[1]、有限元法^[3]、线性积分法^[2]、球面三角形法^[12]和线性矢量法^[4]等，这些方法均由散度的物理定义出发而来，在本质上是相同的。从方法的直观性与计算的简便性考虑，下面主要介绍三角形法与有限元法。

1.1.1 三角形法

根据散度表达式： $\text{div}V = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt}$ ，

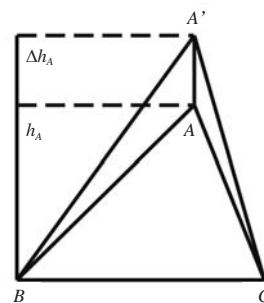


图1 三角形法示意图

Fig.1 Schematic diagram of the triangle method

设A, B, C为三个观测站点（图1），三角形ABC的面积为 σ ，而A点空气向A'方向移动。若A的质点在 Δt 时间内移到A'， h_A 为A点在三角形中的高， Δh_A 为高度 h_A 在 Δt 时间内的增量，而由于A质点移动到A'，三角形ABC的面积在 Δt 时间内的增加率为 $\frac{\Delta h_A}{h_A}$ 。同理，由于B和C点移动的面积增加率分别为 $\frac{\Delta h_B}{h_B}$ ， $\frac{\Delta h_C}{h_C}$ ，则总的面积增加率，即 Δt 时间内的平均水平散度为

$$\text{div}V = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta h_A}{h_A} + \frac{\Delta h_B}{h_B} + \frac{\Delta h_C}{h_C}, \quad (2)$$

即得所求散度^[25]。

1.1.2 有限元法

令 (x_i, y_i) 和 (u_i, v_i) 代表第 i 个观测站的平面坐标位置和水平风观测。当三个观测站构成的三角形内风速可近似视为线性变化时，风场可表示为：

$$\begin{cases} u = u_0 + ax + by \\ v = v_0 + cx + dy \end{cases}, \quad (3)$$

式中， a, b, c, d 均为未知量。可以看出 a 为 $\frac{\partial u}{\partial x}$ ， b 为 $\frac{\partial u}{\partial y}$ ， c 为 $\frac{\partial v}{\partial x}$ ， d 为 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 。

代入三个观测站点信息后可得：

$$\begin{cases} (x_2 - x_1)a + (y_2 - y_1)b = u_2 - u_1 \\ (x_3 - x_1)a + (y_3 - y_1)b = u_3 - u_1 \\ (x_2 - x_1)c + (y_2 - y_1)d = v_2 - v_1 \\ (x_3 - x_1)c + (y_3 - y_1)d = v_3 - v_1 \end{cases}. \quad (4)$$

解方程组(4)后可求得：

$$D = \frac{(u_2 - u_1)(y_3 - y_1) - (u_3 - u_1)(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)(v_3 - v_1) - (x_3 - x_1)(v_2 - v_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

$$\zeta = \frac{(v_2 - v_1)(y_3 - y_1) - (v_3 - v_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(u_3 - u_1) + (x_3 - x_1)(u_2 - u_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}. \quad (7)$$

有限元法相对于三角形法的优点是，它不仅计算出散度，也同时计算出涡度。

1.2 三角形法和有限元法等价证明

虽然两种方法的出发点不同，但可以证明计算得到的散度是等价的。设原三角形 ABC 的第 i 个顶点 (x_i, y_i) 经过 Δt 时间移动到了 $(x_i + u_i \Delta t, y_i + v_i \Delta t)$ ，三角形

$$\delta_F = \frac{(u_2 - u_1)(y_3 - y_1) - (u_3 - u_1)(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)(v_3 - v_1) - (x_3 - x_1)(v_2 - v_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}, \quad (10)$$

当 Δt 趋向于0时， $\delta_F = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$ 即所求散度。 δ_F 的表达式与有限元法求得的 D 是一致的，由此可证明两种方法是等价的。

2 三点法在上海风廓线网中的试验

2.1 个例结果分析与检验

当风廓线网内各部风廓线雷达间距离较短，可不考虑球面风对散度计算的影响。以上海边界层风廓线网为例(图2)，在2014年6月间，组网中共有7部正常运行，分别是浦东LAP3000型和世界博览会园区、

$$\begin{cases} a = \frac{\begin{vmatrix} u_2 - u_1 & y_2 - y_1 \\ u_3 - u_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}}{2A(0)} \\ b = \frac{\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & u_2 - u_1 \\ x_3 - x_1 & u_3 - u_1 \end{vmatrix}}{2A(0)} \\ c = \frac{\begin{vmatrix} v_2 - v_1 & y_2 - y_1 \\ v_3 - v_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}}{2A(0)} \\ d = \frac{\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & v_2 - v_1 \\ x_3 - x_1 & v_3 - v_1 \end{vmatrix}}{2A(0)} \end{cases}, \quad (5)$$

其中

$$A(0) = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

代表这个三角形的面积。

计算出 a, b, c, d 后，即可按散度 $D = a + b$ ，涡度 $\zeta = c - d$ ，得到

的面积由式(6)变为

$$A(\Delta t) = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 + u_1 \Delta t & y_1 + v_1 \Delta t \\ 1 & x_2 + u_2 \Delta t & y_2 + v_2 \Delta t \\ 1 & x_3 + u_3 \Delta t & y_3 + v_3 \Delta t \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$A(\Delta t)$ 可改写成 $A(\Delta t) = A(0)(1 + \delta_F \Delta t) + \mathcal{G}(\Delta t^2)$ ，其中

松江、小洋山、奉贤、嘉定F1、金山六部TWP3型风廓线雷达。由这7个站点可得到35种不同的三角形。然而如何选择合适的三角形组网值得注意。崔一峰^[6]提出，应用三角形法时，散度随面积增加而减小。当固定三角形面积，并固定三端点速度后，选用三角形最大内角作为形状参数时，散度绝对值随着最大内角增大而增大。当最大内角为 60° 时，散度与形状相关性最小；当最大内角超过 152° 时，相对误差将超过100%。可见，选择站点构成三角形时，应尽量避免出现钝角，三个边的长度应尽可能接近。

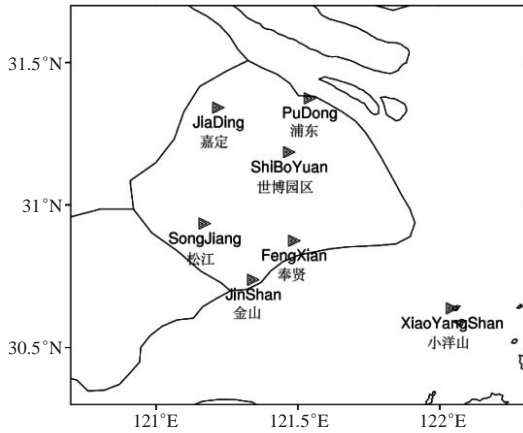


图2 上海地区边界层风廓线组网布局
Fig.2 Layout of wind profiler network in Shanghai

根据上述规则，由于小洋山站远离陆地上其他六站，不利于构成无钝角且大小相近的三角形，因此仅用陆地上六站构成的四个三角形（图3中绿色数字）组成网络。四个三角形（由北至南）的顶点站分别是：

- 1) 浦东、嘉定F1、世博园区；
- 2) 嘉定F1、世博园区、松江；
- 3) 松江、世博园区、奉贤；

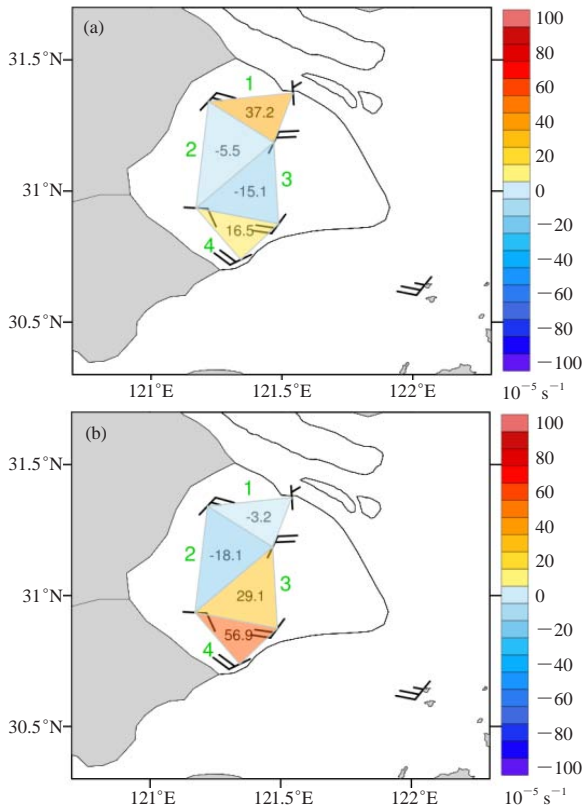


图3 2014年6月21日08时上海地区940m高度上水平风及散度 (a)、涡度 (b) 分布 (单位: $10^{-5} s^{-1}$)
Fig.3 Distribution of (a)divergence and (b)vorticity at 940m above ground in Shanghai at 08:00 BT 21 June, 2014 (unit: $10^{-5} s^{-1}$)

4) 松江、奉贤、金山。

上述四个三角形中均不含钝角且面积相近。

根据有限元法，根据各顶点的经纬度坐标与水平风数据，分别计算得到四个三角形内不同时次下的涡度与散度值。图3为2014年6月21日08时上海地区风廓线组网在940m高度上观测到的水平风及散度、涡度分布。在各个三角形中心标示出该三角形内的散度（图9a）或涡度（图9b）值，并用填色来反映散度和涡度的大小。图4为该时次三角形3（图3）的散度和涡度垂直廓线。

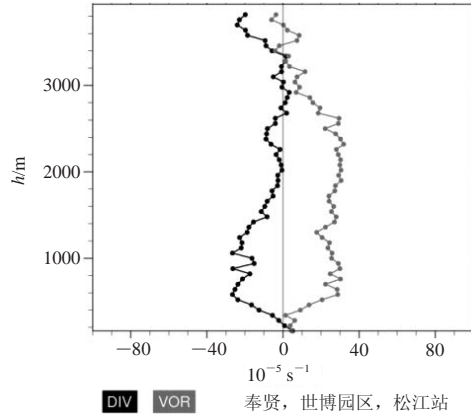


图4 2014年6月21日08时奉贤、世博园区、松江站散度 (DIV) 与涡度 (VOR) 垂直廓线 (单位: $10^{-5} s^{-1}$)
Fig.4 Vertical profile of divergence and vorticity at Fengxian, Shiboyuan and Songjiang Stations at 08:00 BT 21 June, 2014 (unit: $10^{-5} s^{-1}$)

从图3和图4可以看出松江、世博园区、奉贤间地区在中低空存在明显正涡度，同时有较明显辐合相配合。结合常规天气资料可知，6月21日上午上海处于梅雨锋上，有强降水发生，根据850hPa天气图（图5）上实测风可判断上海附近存在气旋性辐合，配合弱低压中

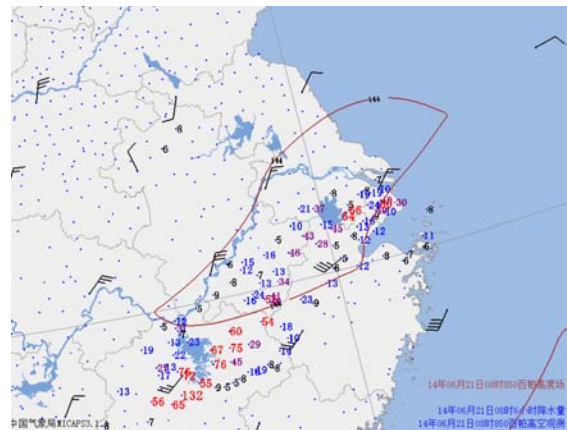


图5 2014年6月21日08时综合天气图 (850hPa风场及高度场 (红线) 及6h降水量 (>5mm))
Fig.5 Synoptic chart at 08:00 BT 21 June, 2014 (wind plots and height (red isolines) at 850hPa, 6 h precipitation (>5mm))

心, 与由风廓线观测和计算得到的涡度、散度分布相符。

2.2 与其他方法的对比

为比较三点法应用于风廓线资料的效果与优势, 使用差分方法对同一个例进行检验与比较。首先将陆上6部风廓线资料插值至范围相近的 2×4 的正交网格, 范围(图6)为: $30.75^\circ - 31.35^\circ \text{N}$, $121.2^\circ - 121.5^\circ \text{E}$ 。然后利用差分方法计算每个长方形中心的散度与涡度。

与图3对比发现, 两种方法计算得到的各区间的散度与涡度均有明显差异。造成明显差异的原因包括: 首先在水平风插值过程中, 风向与风速均发生了变动, 使得风场结构偏离了真实观测场。其次在差分计算过程中, 需考虑格点周围四点的风场, 其中某些点的风场是由外插计算得到的, 增加了计算的误差。与实况(图5)对比后可知, 差分方法得到的涡度与

散度分布准确性不及三点法的效果。

另外由于差分方法与插值的方法密切相关, 扫描半径的大小、权重系数、与距离的关系都会导致结果的不一致, 因此差分法的结果是不唯一的。本研究将2014年6月21日08时美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 全球分析资料插值至 $9\text{km} \times 9\text{km}$ 的格点场后, 利用差分方法计算上海地区上空850hPa的散度与涡度分布(图7)。虽然风场的计算结果大致上与实况接近, 但由于分辨率较粗, 即使插值至细分辨率, 也无法体现中小尺度系统的精细结构, 因此其涡度场与散度场分布更均匀, 涡度与散度平均值更小。Stull^[26]指出散度波动的尺度越小, 强度越大, 周期越短。95%的散度波动的周期都在8h以内, 周期在1h以内的波动出现几率为1h以上的10倍, 因此, 大尺度长周期的观测网很难观测到散度波动的局地变化。利用

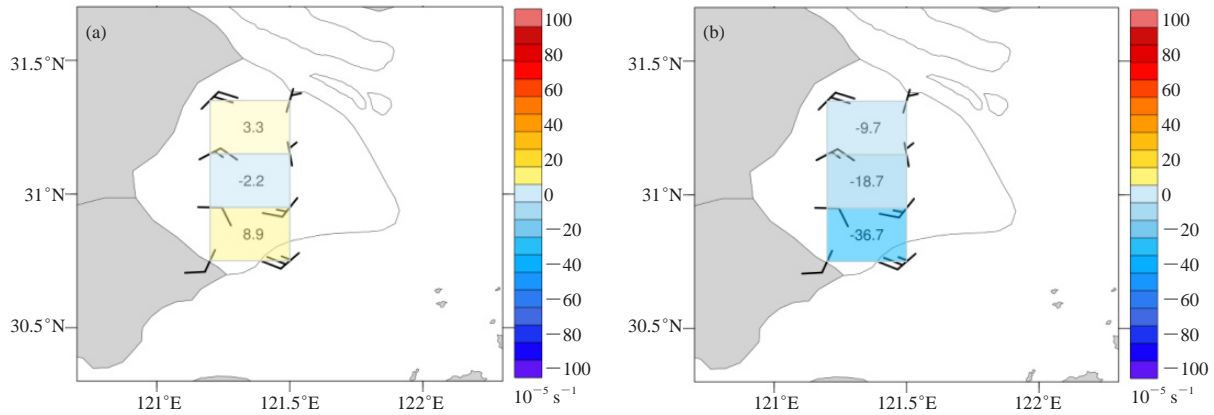


图6 2014年6月21日08时上海地区940m高度上水平风与散度(a)及水平风与涡度(b)分布(单位: 10^{-5}s^{-1})
Fig.6 Distribution of (a) divergence and horizontal wind, (b) vorticity and horizontal wind at 940m above ground in Shanghai at 08:00 BT 21 Jun, 2014 (unit: 10^{-5}s^{-1})

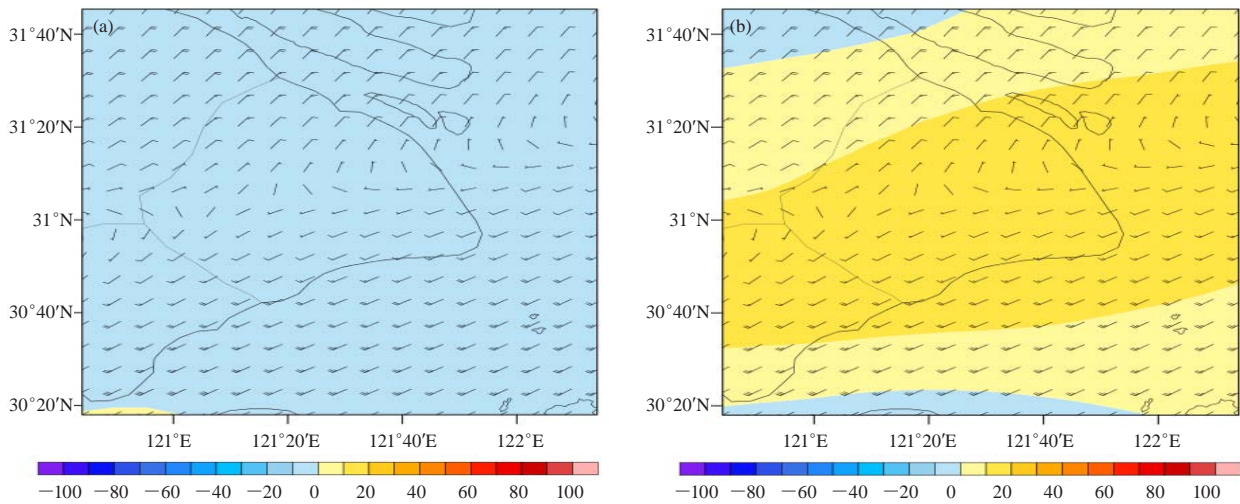


图7 2014年6月21日08时上海地区850hPa上水平风和散度(a)及水平风与涡度(b)分布(单位: 10^{-5}s^{-1})
Fig.7 Distribution of (a) divergence and horizontal wind, (b) vorticity and horizontal wind at 850hPa in Shanghai at 08:00 BT 21 Jun, 2014 (unit: 10^{-5}s^{-1})

三点法分析探空站组成的观测网可得到在当时（1988年）最准确的散度分析。而如今风廓线网的观测频率可达每6min一次，观测密度高于探空站，是极佳的分析散度变化的手段。

3 结论与讨论

本文首先对实测风计算水平散度与涡度的研究进行了回顾，早期人们运用三点法可以便捷、快速地计算出三个不共线探空站点间的散度、涡度分布，然而由于探空站点间距离远，探空观测频次较低等不利因素，得到的散度、涡度误差较大，需要经过多种订正，因而这方面的研究逐渐停滞。近年来随着风廓线雷达在全国范围内的建设，为预报员提供了更高时空分辨率的实时风场观测。将三点法应用于风廓线组网上，可实时监测到更精细的涡度、散度及其变化，有利于更细致地分析中尺度系统结构，为短时预报服务。

本文介绍了两种主流的三点法的计算原理，分别是面积膨胀率出发的三角形法与假设风场线性分布的有限元法，并证明其等价性。上海地区布设了全国最密集的边界层风廓线观测网，以之为例，运用有限元法，计算了一次梅雨期间强降水过程时的散度、涡度分布。水平分布与垂直结构均显示存在明显正涡度区与负散度区，与降水发生相配合。与差分方法相比，误差更小；与大尺度观测或分析资料相比，更能体现中小尺度的精细结构。

由此可见三点法用于风廓线组网，可得到实时三维空间的散度、涡度分布，有助于预报员了解天气系统的精细结构，迅速找到强上升运动区域和涡旋结构，可用于强降水的短时临近预报，未来其可作为中尺度的基本分析业务之一。

参考文献

- [1] Bellamy J C. Objective calculations of divergence, vertical velocity, and vorticity. *Bull Amer Meteor Soc*, 1949, 30: 45-49.
- [2] Ceselski B F, Larry L. Sapp: objective wind field analysis using line integrals. *Mon Wea Rev*, 1975, 103: 89-100.
- [3] Endlich R M, Clark J R. Objective computation of some meteorological quantities. *J Appl Meteor*, 1963, 2: 66-81.
- [4] Zamora R J, Shapiro M A, Doswell C A III. The diagnosis of upper tropospheric divergence and ageostrophic wind using profiler wind observations. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 871-884.
- [5] Caracena F. Analytic approximation of discrete field samples with weighted sums and the gridless computation of field derivatives. *J Atmos Sci*, 1987, 47(24): 3753-3768.
- [6] 陶祖钰, 谢安. 天气过程诊断分析原理和实践. 北京: 北京大学出版社, 1989.
- [7] Davies-Jones R. Useful formulas for computing divergence, vorticity, and their errors from three or more stations. *Mon Wea Rev*, 1993, 121: 713-725.
- [8] Carlson C A, Forbes G S. A case study using kinematic quantities derived from a triangle of VHF Doppler Wind Profilers. *J Atmos Ocean Tech*, 1989, 6(5): 769-778.
- [9] 文宝安. 水平散度的几种计算方法. *气象*, 1980, 6(5): 32-36.
- [10] 丁士晟, 仲雅琴, 杨自植. 用有限元法进行定量天气分析//北方天气文集编委会. 北方天气文集(2). 北京: 北京大学出版社, 1982.
- [11] 廖洞贤, 王两铭, 王超, 等. 一个直接用观测资料计算大范围散度、涡度和垂直速度的方案. *气象学报*, 1980, 38(4): 309-320
- [12] 施永年. 动力气候学中客观计算散度场和涡度场的一种新方案. *气象学报*, 1982, 40(4): 490-496.
- [13] 尚可政, 王式功, 杨德保, 等. 三角形法计算涡度和散度的一种改进方案. *高原气象*, 1999, 18(2): 125-129.
- [14] 彭金泉, 黄佩玲. 计算任意多边形平均涡度、散度的一种方案. *气象*, 1986, 12(12): 12-14.
- [15] 蔡定军, 郑宏翔. 一个计算球面不规则多边形内平均涡度、散度的方案. *气象学报*, 1991, 49(3): 358-363.
- [16] 崔一峰. 计算散度的三点法比较及订正新方案. *气象*, 1989, 15(6): 15-20.
- [17] 陶祖钰. 从单Doppler速度场反演风矢量场的VAP方法. *气象学报*, 1992, 50(1): 81-90
- [18] 刘淑媛, 陶祖钰. 从单多普勒雷达速度场反演散度场. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 41-48
- [19] Thomas M, Srivastava R C. An improved version of the extended velocity azimuth display analysis of single-Doppler radar data. *J Atmos Ocean Tech*, 1991, 8(4): 453-456.
- [20] 胡志群, 夏文梅, 汤达章, 等. 多普勒雷达速度图像识别及散度提取方法研究. *高原气象*, 2007, 26(4): 821-829.
- [21] 杨波, 魏东. 二次开发风廓线探测资料及其在天气预报中的应用. *气象科技*, 2010, 38(4): 413-417.
- [22] 吴志根, 徐同, 丁若洋, 等. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析. *气象*, 2013, 39(30): 370-376
- [23] 顾映欣, 陶祖钰. UHF多普勒风廓线雷达资料的初步分析和应用. *气象*, 1991(1): 29-34.
- [24] 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系. *热带气象学报*, 2003, 19(3): 285-290.
- [25] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1992
- [26] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.