通量方差法估算海气界面动量通量的分析

薛宇欢[1,2,3,4], 陈 胜[1,2,3,4*], 刘展池[1,2,3], 马洪余[1,2,3], 陈思宇[1,2,3]

（1. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061；
2. 崂山实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室，山东 青岛 266237；
3. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验，山东 青岛 266061；
4. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验，山东 青岛 266061）

摘 要：利用南海北部博贺海洋气象观测平台涡动相关系统的长期湍流观测资料，分析并讨论了不同大气稳定度条件下的湍流通量方差相似性关系，提出了适用于小于 18 m/s 风速的归一化标准差与稳定度的参数化关系公式。应用通量方差法估算了海气界面的动量通量与摩擦速度，并与涡动相关系统的观测结果进行对比分析，对参数化公式进行了检验。结果表明：不同大气层结条件下的速度归一化标准差与大气稳定度满足 1/3 相似性关系，基于相似性函数的通量方差法估算结果与涡动相关系统测量结果较为一致，不稳定大气层结条件下的相关性高于稳定层结条件。应用通量方差法估算近海海气界面动量通量是可行的。

关键词：通量方差法；涡动相关法；海气界面；动量通量；摩擦速度
中图分类号：P731 **文献标志码：**A **文章编号：**1671-6647（2023）03-0412-08
doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220627002
引用格式： 薛宇欢, 陈胜, 刘展池, 等. 通量方差法估算海气界面动量通量的分析[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(3): 412-419. XUE Y H, CHEN S, LIU Z C, et al. Analysis of the air-sea momentum flux estimated by flux-variance method[J]. Advances in Marine Science, 2023, 41(3): 412-419.

基于莫宁-奥布霍夫相似理论（Monin-Obukhov Similarity Theory，MOST）的通量方差法（Flux-Variance method，FV 法）最先由 Tillman 于 1972 年提出[1]，其采用速度和温度标准差与稳定度之间的关系间接计算湍流通量。相对涡动相关法，FV 法具有较低要求，被认为是估算湍流通量的简单有效方法之一，在陆气界面通量方面得到广泛的应用[2-5]，但在海气界面的应用较少[6]。

涡动相关法（Eddy-Covariance method，EC 法）作为湍流通量最直接的测量方法，利用三维超声风速仪、二氧化碳水汽分析仪等快速响应的传感器测量温度、风速、水汽和二氧化碳的脉动量，在一定平均时间间隔（15～60 min）内计算脉动量的协方差来计算湍流通量。快速响应的传感器对仪器安装的位置和方向以及采样频率等具有很高的要求，因此，在海面利用涡动相关法测量湍流通量有一定难度[7]。通量方差相似性关系可作为补充工具根据低频参量来估计通量。

在不同下垫面和大气稳定度条件下，通量方差法计算与涡动相关法测量得到的湍流通量结果不尽相同。国内外很多学者对陆地下垫面的湍流通量对比试验做了详细的研究[2-3,8]，尽管不同的湍流通量结果有差别，但都表明通量方差法在计算陆气界面的感热通量、潜热通量、动量通量等方面存

收稿日期：2022-06-27
资助项目：国家自然科学基金面上项目（42276024）；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目（2022Q01）；崂山实验室山东省专项经费资助项目（2022QNLM010102）
作者简介：薛宇欢（1981—），男，工程师，硕士，主要从事海气通量方面研究. E-mail: xueyh@fio.org.cn
*** 通信作者：**陈 胜（1989—），男，副研究员，博士，主要从事海浪与小尺度海气相互作用方面研究. E-mail: Rain@fio.org.cn

（王 燕 编辑）

在一定的可行性。Lloyd 等[8] 通过在裸土、休耕期草地及灌木下垫面上进行的观测实验，比较了 FV 法计算与 EC 法测量的感热通量，两者平均相关系数达 0.94，且结果表明相似性函数关系具有普适性。Katul 等[2] 在 3 个不同站点（异龄森林、裸土以及绿草覆盖的森林）上的通量观测实验结果表明，动量通量和感热通量的 FV 法计算与观测结果具有较好一致性，而潜热通量存在较大差异。De Bruin 和 Hartogensis 提出了无量纲经验参数ζ_σ，并再次证实了 Katul 等的结果[3]。王少影等[9] 和 Ahiman 等[5] 分别利用绿洲、戈壁点的观测资料，以及 3 种不同农作物下垫面上的资料，均表明了通量方差法的适用性。

以往应用通量方差法估算湍流通量的大部分研究集中于陆气界面，而用于海气界面湍流通量的较少。徐安伦等[6] 通过确定速度和温度归一化标准差与稳定度之间的关系，估算了沿海近地面层的动量和感热通量，指出 FV 法估算沿海近地面层湍流通量具有一定代表性，与观测结果相关性较高，但观测地点在厦门市附近靠海的小院内，水平距离海岸约 25 m，分析所用的观测数据也相对较少。

利用海上固定观测平台开展长时间的通量观测获取长期观测数据，为研究通量方差法估算海气界面湍流通量的可行性提供了新的契机。基于自然资源部第一海洋研究所设计的涡动相关综合观测系统对海气界面湍流通量进行直接观测，利用南海北部博贺海洋气象观测平台于 2015 年 8 月 27 日至 2016 年 5 月 21 日长期的观测数据，本文分析并讨论了不同大气稳定度条件下的通量方差相似性关系，提出了速度归一化标准差与稳定度的统一参数化公式，并利用通量方差法估算了动量通量与摩擦速度，与涡动相关法直接观测结果进行了对比分析，最后对参数化公式进行了检验。

1　通量方差法

通量方差法以莫宁-奥布霍夫相似理论（Monin-Obukhov Similarity Theory，MOST）为基础而建立，MOST 以物理问题相似性观点和量纲分析方法，描述了切应力和浮力对近地面层湍流输送的影响，建立了近地层气象要素垂直分布的普适性函数[10]。根据 MOST，速度归一化标准差σ_i/u_*是无量纲稳定度参数ζ的普适函数[11]，可写为：

$$\frac{\sigma_i}{u_*}=\begin{cases}\alpha_i(1-\beta_i\zeta)^{1/3} & \zeta\leqslant 0\\ \alpha_i(1+\beta_i\zeta)^{1/3} & \zeta>0\end{cases},\tag{1}$$

式中：σ_i为不同分量的风速标准差，$i=u$、$i=v$ 和 $i=w$ 分别表示水平顺风向、横风向和垂向风速分量，由三维超声风速仪直接观测获得；摩擦速度u_*根据涡动相关法计算，即$u_*=(\overline{u'w'}^2+\overline{v'w'}^2)^{1/4}$，其中$\overline{u'w'}$和$\overline{v'w'}$是顺风向和横风向的运动学垂直动量通量，$u'$、$v'$和$w'$分别为三维风速分量的脉动值；$\alpha_i$和$\beta_i$为经验系数；无量纲稳定度参数$\zeta=z/L$，$z$ 为距离地面或海面的测量高度，L 为莫宁-奥布霍夫长度，定义为：

$$L=-\frac{u_*^3\overline{\theta}}{\kappa g\overline{w'\theta'}}=\frac{u_*^2\overline{\theta}}{\kappa g\theta_*},\tag{2}$$

式中：$\overline{\theta}$为空气平均温度；κ=0.4，为 Karman 常数；g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2；$\overline{w'\theta'}$为运动学上的热量通量；θ_*是温度的特征尺度。式（2）中的上横线代表雷诺平均，撇号表示物理量的湍流脉动。

由式（1）和式（2）得到无量纲风速归一化标准差和无量纲稳定度参数值，拟合两者的关系曲线，确定函数关系式，从而求解出式（1）中的经验系数α_i和β_i。将式（1）代入动量通量的定义式$\tau=\rho u_*^2$，可得：

$$\tau=\rho(u_*)^2=\rho\left[\frac{\sigma_i}{\alpha_i(1+\beta_i|\zeta|)^{1/3}}\right]^2。\tag{3}$$

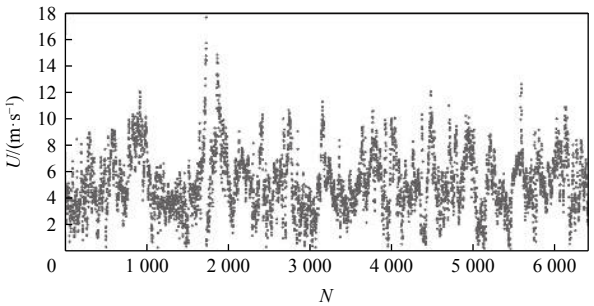
式中ρ 为空气密度。应用通量方差法，根据式（3）可估算出湍流动量通量。

2 观测资料

博贺海洋气象观测平台（111°23′30″E，21°26′30″N）位于广东省茂名市电白区莲头岭半岛中部东面约6.5 km 海域处，平均水深约 16 m。自然资源部第一海洋研究所设计的涡动相关综合观测系统架设在平台上距平均海面约 17 m 处，于 2015 年开始对海气界面湍流通量进行长期连续观测[12-13]。观测设备包括 CSAT3A 三维超声风速仪、CO_2/H_2O 红外气体分析仪、温度和湿度传感器等，采样频率设置为 10 Hz，通过数据采集器连续采集获取高频数据，本文所用数据主要来自三维超声风速仪获取的高频三维风速。超声风速仪的风速测量范围为 0～60 m/s， 水平风速 u 和 v 的测量精度为 1 mm/s；垂向风速 w 的测量精度为 0.5 mm/s。

本文所用数据为 2015 年 8 月 27 日至 2016 年 5 月 21 日的观测资料，但数据存在间断性。首先选取 2015 年 8 月 27 日至 10 月 4 日 17:00、2015 年 10 月 8 日至 10 月 14 日、2016 年 2 月 8 日至 3 月 30 日以及 2016 年 4 月 1 日至 5 月 21 日 10:00 共 4 段 10 Hz 原始资料（以下简称 DATA1），分析讨论风速归一化标准差与稳定度的函数关系，并利用通量方差法估算动量通量以及摩擦速度，与涡动相关法直接观测结果进行对比分析，而后利用 2015 年 12 月 24 日至 2016 年 1 月 29 日冬季的 10 Hz 原始资料（以下简称 DATA2）对提出的相似性函数进行检验。

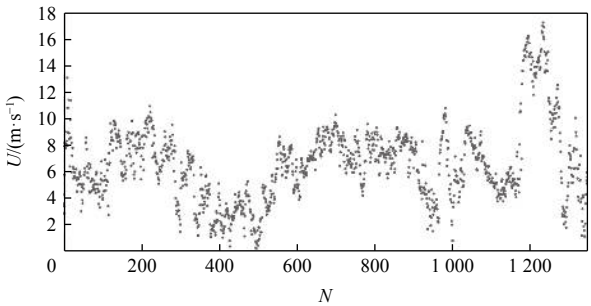
数据处理方法参照王介民[7]，针对 DATA1 资料以 30 min 平均时间间隔，经过野点剔除、坐标旋转等数据处理后得到 7 108 组数据，根据风向及湍流平稳性进行质量控制得到 6 420 组通量数据。同样地，对 DATA2 进行数据处理，质量控制后得到 1 348 组通量数据。2 组数据的风速时间序列如图 1 和图 2 所示，可以看到，风速最大可达近 18 m/s，大多集中于风速 2～10 m/s，在该风速范围内 DATA1 和 DATA2 数据分别占比约 92% 和 88%。DATA1 序列的平均风速约为 5.2 m/s，DATA2 的约为 6.6 m/s。



注：N 为数据量，共 6 420 组。

图 1 DATA1 的风速数据序列

Fig. 1 Wind speed time series of DATA1



注：N 为数据量，共 1 348 组。

图 2 DATA2 的风速数据序列

Fig. 2 Wind speed time series of DATA2

3 结果分析

将处理后的 DATA1 数据按照大气层结稳定度参数 $\zeta=z/L$ 分为不稳定大气层结（$-100<\zeta<0$）数据（简称 UN-DATA）和稳定大气层结（$0<\zeta<100$）数据（简称 ST-DATA），其中，UN-DATA 包含 3 596 组，ST-DATA 包含 2 819 组，不考虑极端稳定和极端不稳定层结情况，极端情况下湍涡运动与地面失去耦合，高度将不是支配湍流相似性的参数[10]。

3.1　通量方差相似性关系

首先，利用 UN-DATA 数据分析风速归一化标准差σ_i/u_*与大气层结稳定度参数ζ之间的关系，如图 3 所示。由图 3 可以看出，速度归一化标准差与稳定度之间基本上满足 1/3 定律，根据式(1)拟合不稳定大气层结条件下 UN-DATA 的函数关系曲线，结果为：

$$\sigma_u/u_* = 2.55(1-3.78\zeta)^{1/3}, \tag{4}$$

$$\sigma_v/u_* = 2.28(1-3.95\zeta)^{1/3}, \tag{5}$$

$$\sigma_w/u_* = 1.05(1-3.25\zeta)^{1/3}。 \tag{6}$$

图 4 给出了 ST-DATA 的速度归一化标准差和稳定度之间的散点图和标准误差棒线，并且利用不稳定层结下的相似函数中的相同系数根据式(1)拟合了速度归一化标准差和大气稳定度。可以看到，在稳定大气层结条件下，速度归一化标准差与大气稳定度满足 1/3 定律，且不稳定层结下相似函数的相同系数能较好地拟合两者关系。在不稳定层结条件下，风速 u、v、w 分量的归一化标准差与拟合函数计算结果的相关系数 R^2 分别为 60.5%、65.2%、87.7%；在稳定层结条件下，风速 u、v、w 分量的归一化标准差与拟合函数计算结果的相关系数 R^2 分别为 59.9%、55.2%、69.2%。不稳定和稳定层结条件下的速度 w 分量的归一化标准差值要比 u 及 v 分量的结果更为汇聚(图 3 和图 4)，且相关系数更高。这是因为，湍流垂直速度涨落的能量主要来源于浮力做功，而且对其有贡献的湍涡尺度受到地面的限制，能较好地满足近地面层相似性规律，而湍流的水平速度涨落能量并不直接来源于浮力做功，湍涡运动受地面限制小，主要受整个边界层特性的制约，高度和奥布霍夫长度 L 将不能充分支配其相似性规律。

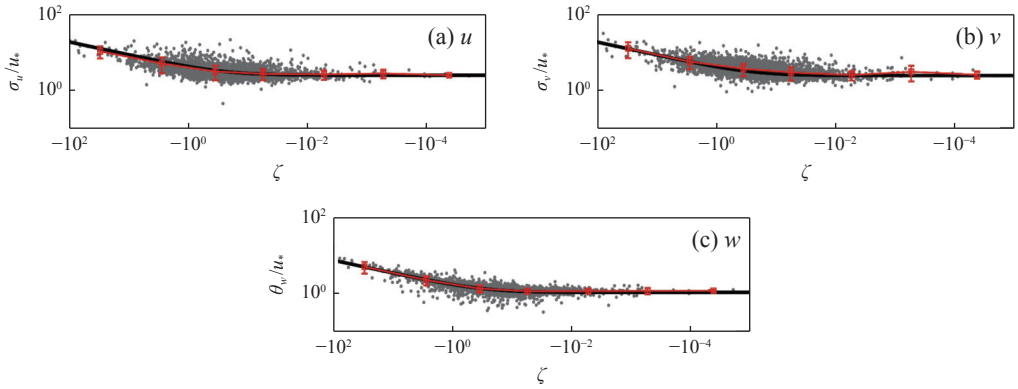
因此，速度归一化标准差与大气稳定度的拟合曲线可表示为：

$$\sigma_u/u_* = 2.55(1+3.78|\zeta|)^{1/3}, \tag{7}$$

$$\sigma_v/u_* = 2.28(1+3.95|\zeta|)^{1/3}, \tag{8}$$

$$\sigma_w/u_* = 1.05(1+3.25|\zeta|)^{1/3}。 \tag{9}$$

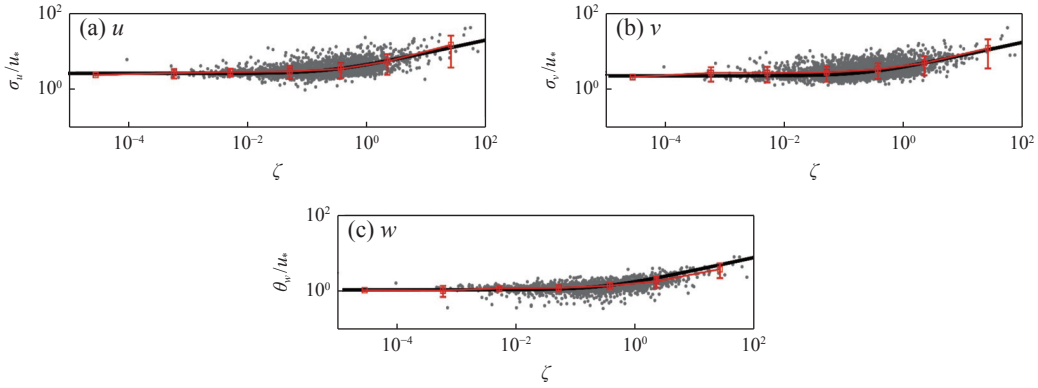
由式(7)至式(9)可以计算出，当$|\zeta|$=100 时，σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_*分别达 18.5、16.7、7.2。而当$|\zeta|$趋于 0 时，σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_*分别为常数 2.55、2.28、1.05，因此可以推出中性大气层结条件下风速归一化标准差为常数，σ_u/u_* =2.55、σ_v/u_* =2.28、σ_w/u_* =1.05。与前期大量观测的中性层结条件下的结果较为一致，但由于不同的观测地点或不同的下垫面状况等因素影响使得结果存在少许差异。



注：灰线为拟合曲线；红线为标准误差棒线，红色矩形表示 lg 子区间内的平均值。

图 3　不稳定层结条件下的风速分量 *u*、*v*、*w* 的速度归一化标准差与大气稳定度的关系

Fig. 3　Relationship between the normalized standard deviation of wind velocity component *u*, *v*, *w* and the atmospheric stability under unstable stratification conditions



注：灰线为拟合曲线；红线为标准误差棒线，红色矩形表示 lg 子区间内的平均值。

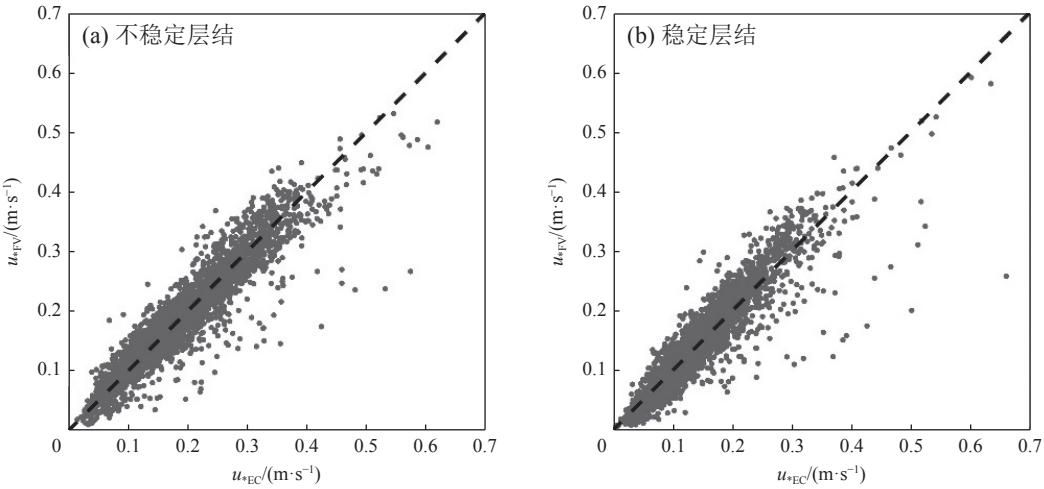
图 4 稳定层结条件下的风速分量 *u*、*v*、*w* 的速度归一化标准差与大气稳定度的关系

Fig. 4 Relationship between the normalized standard deviation of wind velocity component *u*, *v*, *w* and the atmospheric stability under stable stratification conditions

式(7)至式(9)中的相似性常数与以往研究对不稳定大气层结和稳定大气层结给出的相似性常数有所差异，前期研究将两者分离，给出不同的参数化公式，没有提出统一的函数关系[3-4,6,9]，本文给出了不同大气层结条件下的统一的相似性函数关系，具有一定代表性。

3.2 利用通量方差法计算动量通量

根据 3.1 节的分析与讨论，速度 w 分量的归一化标准差值比 u 及 v 分量的结果更为汇聚，所以，根据式(9)，$\sigma_w/u_* = 1.05(1+3.25|\zeta|)^{1/3}$，依据式(3)对不稳定和稳定层结条件下摩擦速度及动量通量分别进行计算，将计算结果与测量结果比较并作出 1∶1 散点图，见图 5，值得注意的是，摩擦速度与动量通量一一对应，为了放大对比效果，图 5 仅给出了摩擦速度图。可以看出，通量方差法估算的结果和观测结果相关性高，稳定大气层结条件下，动量通量 τ 和摩擦速度 u_* 的相关系数分别为 87.0% 和 91.5%；不稳定大气层结条件下 τ 和 u_* 的相关系数分别为 90.4% 和 93.9%。其次，将 UN-

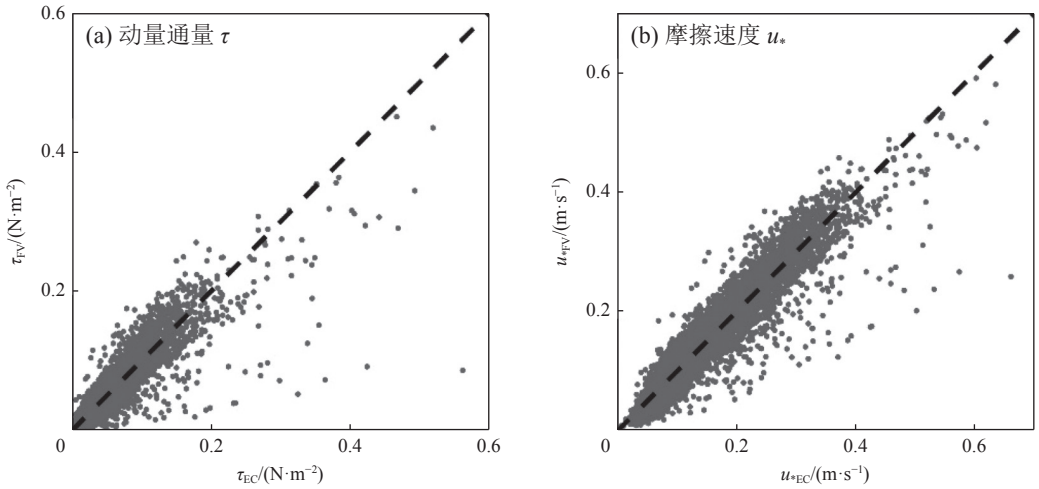


注：下标 FV、EC 分别表示通量方差法、涡动相关法；黑色虚线为 1∶1 比例线。

图 5 不稳定和稳定层结条件下摩擦速度 u_* 的计算值与测量值比较

Fig. 5 Comparison between the estimated and the measured values of friction velocity u_* under unstable and stable stratification conditions

DATA 和 ST-DATA 数据综合考虑，并利用通量方差法计算与涡动相关法测量结果对比分析，如图 6 所示。计算结果与测量结果对比表明，τ 和 u_* 的相关系数分别达 89.5% 和 93.2%，标准偏差分别为 0.024 1 N/m^2 和 0.031 5 m/s，误差分别为 0.000 7 N/m^2 和 0.001 2 m/s。结果表明，通量方差法得到的动量通量与涡动相关法观测的动量通量具有很好的一致性，通量方差法能较好地估算动量通量。

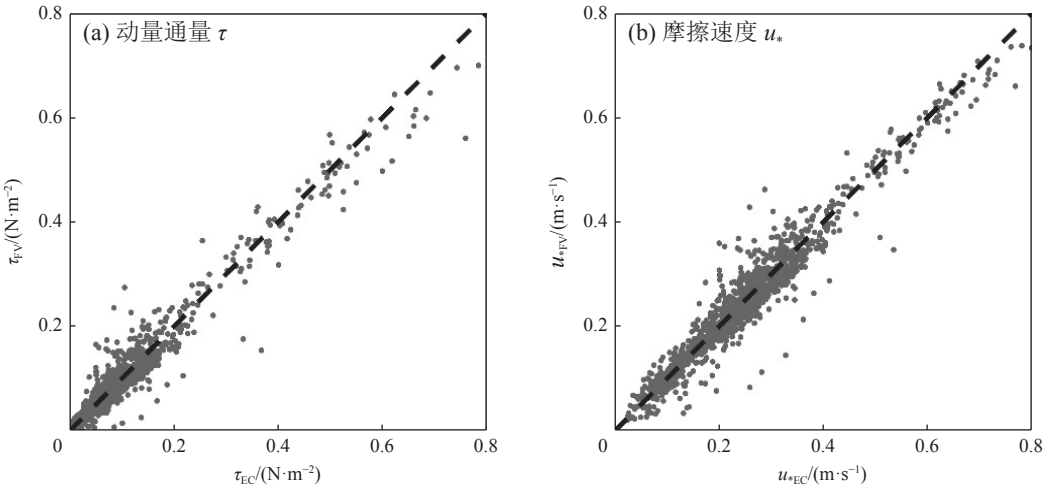


注：下标 FV、EC 分别表示通量方差法、涡动相关法；黑色虚线为 1∶1 比例线。

图 6　DATA1 的动量通量 τ 和摩擦速度 u_* 的计算值与测量值比较

Fig. 6　Comparison between the estimated and the measured values of momentum flux τ and friction velocity u_* of DATA1

上文根据 DATA1 资料分析与讨论了通量方差法的有效性，结果表明通量方差法估算湍流通量是可行的。为检验式(9)是否在计算该站点的湍流动量通量具有更强的代表性，本文再利用 DATA2 数据进行分析。根据式(9)，应用 FV 法对动量通量 τ 和摩擦速度 u_* 进行计算，绘制计算值与测量值的 1∶1 散点图，见图 7。可以看出，计算值与测量值两者相关性很高，τ 和 u_* 的相关系数分别达 97.4% 和 96.8%，标准偏差分别为 0.025 3 N/m^2 和 0.031 3 m/s，误差分别为 0.001 9 N/m^2 和 0.002 1 m/s，该结果表明了参数化式(9)的有效性，且提出的参数化关系公式在估算博贺固定观测平台的湍流动量通量具有一定程度的适用性。



注：下标 FV、EC 分别表示通量方差法、涡动相关法；黑色虚线为 1∶1 比例线。

图 7　DATA2 的动量通量 τ 和摩擦速度 u_* 的计算值与测量值比较

Fig. 7　Comparison between the estimated and the measured values of momentum flux τ and friction velocity u_* of DATA2

4 结 论

本文利用博贺海洋气象观测平台的海气界面湍流通量的长期观测资料分析讨论了动量通量方差相似性规律，并对通量方差法应用于海气界面动量通量估算的可行性进行了探讨，得到以下主要结论。

1)南海北部近岸平台处，稳定与不稳定大气层结条件下的速度归一化标准差与大气稳定度的关系满足 1/3 相似性规律，速度 w 分量的归一化标准差值比 u 及 v 分量的结果更为汇聚。中性层结条件下，速度分量的归一化标准差趋于常数，并且速度归一化标准差随稳定度绝对值的增加而增加。

2)根据不稳定层结条件下的参数化公式对稳定层结条件的相似性函数关系进行了拟合，给出了不同大气层结条件下速度归一化标准差与稳定度间统一的相似性参数公式。该公式适用于风速范围 0～18 m/s，需要后续检验。

3)在给定相似性函数公式基础上，应用通量方差法对动量通量的估算结果与涡动相关法的测量结果具有较好的一致性，两者相关性高。经过对相似性参数化公式的检验表明，通量方差法估计南海北部近海海气界面的湍流动量通量是可行的，能够为湍流通量的长期变化研究以及检验已获取数据的质量提供支持。

参考文献 (References):

[1] TILLMAN J E. The indirect determination of stability, heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions[J]. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11(5): 783-792.

[2] KATUL G, GOLTZ S M, HSIEH C I, et al. Estimation of surface heat and momentum fluxes using the flux-variance method above uniform and non-uniform terrain[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1995, 74(3): 237-260.

[3] DE BRUIN H A R, HARTOGENSIS O K. Variance method to determine turbulent fluxes of momentum and sensible heat in the stable atmospheric surface layer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 116(2): 385-392.

[4] WANG S Y, ZHANG Y, LÜ S H, et al. Estimation of turbulent fluxes using the flux-variance method over an alpine meadow surface in the eastern Tibetan Plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(2): 411.

[5] AHIMAN O, MEKHMANDAROV Y, PIRKNER M, et al. Application of the flux-variance technique for evapotranspiration estimates in three types of agricultural sructures[J]. International Journal of Agronomy, 2018: 7935140-1-7935140-13.

[6] 徐安伦, 吴晓庆, 许利明, 等. 通量-方差法估算沿海近地面层的湍流通量分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(6): 708-712. XU A L, WU X Q, XU L M, et al. Analysis of flux-variance method in estimation of turbulent flux in the surface layer over coastal area[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 24(6): 708-712.

[7] 王介民. 涡动相关通量观测指导手册 (Ver. 20120212)[DB/OL]. [2022-06-27]. http://westdc.westgis.ac.cn/water/surveystd. 2012. WANG J M. The instruction manual of the eddy flux observation (Ver. 20120212)[DB/OL]. [2022-06-27]. http://westdc.westgis.ac.cn/water/surveystd. 2012.

[8] LLOYD C R, CULF A D, DOLMAN A J, et al. Estimates of sensible heat flux from observations of temperature fluctuations[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1991, 57(4): 311-322.

[9] 王少影, 张宇, 吕世华, 等. 应用通量方差法估算戈壁绿洲下垫面湍流通量的研究[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1214-1222. WANG S Y, ZHANG Y, LÜ S H, et al. Estimation of turbulence fluxes using the flux-variance method over the Gobi and oasis surfaces[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(6): 1214-1222.

[10] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 243-255. SHENG P X, MAO J T, LI J G,

et al. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 243-255.

[11] BABIĆ N, VEČENAJ Ž, DE WEKKER S F J. Flux-variance similarity in complex terrain and its sensitivity to different methods of treating non-stationarity[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2016, 159(1): 123-145.

[12] 陈胜, 乔方利, 郭景松, 等. 海面风应力偏离风向的观测与分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 28-35. CHEN S, QIAO F L, GUO J S, et al. The observation and analysis on the deviation of wind stress direction from wind direction[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(1): 28-35.

[13] CHEN S, QIAO F L, HUANG C J, et al. Deviation of wind stress from wind direction under low wind conditions [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(12): 9357-9368.

Analysis of the Air-Sea Momentum Flux Estimated by Flux-Variance Method

XUE Yuhuan[1,2,3,4], CHEN Sheng[1,2,3,4], LIU Zhanchi[1,2,3], MA Hongyu[1,2,3], CHEN Siyu[1,2,3]

（1. *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China；
2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling*, *Laoshan Laboratory*, Qingdao 266237, China；
3. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR,* Qingdao 266061, China；
4. *Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling*, Qingdao 266061, China）

Abstract: Turbulence flux variance similarity relation was studied and parameterization based on between the wind speed (＜18 m/s) normalized standard deviation and stability was proposed under different atmospheric stability conditions based on the long-term observation of eddy covariance system at the Bohe marine meteorological observation platform in the northern South China Sea. Air sea momentum flux was estimated with flux-variance method and compared with the observations of eddy covariance system observations for verification of the parameterization. The results show that the normalized standard deviation of velocity under different atmospheric stratification conditions satisfy the 1/3 similarity relationship. The estimation by flux-variance method is consistent with the eddy covariance measurements, and their correlation is higher under unstable atmospheric stratification condition than that under stable stratification condition. It is practical and reliable to estimate the momentum flux of air-sea interface in the coastal waters with the flux-variance method.

Key words: flux-variance method；eddy covariance method；air-sea interface；momentum flux；friction velocity

Received: June 27, 2022