

# 激光雷达数据应用于海气界面气体传输速率的估算

吴 东 王建华 阎逢旗

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要** 选取 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月夜间无云的云-气溶胶激光雷达和红外探测者观测卫星(CALIPSO)星载激光雷达 Version 3.01 数据,提取 532 nm 激光海面后向散射系数并计算海面波浪均方斜率。同时选用准同步 AMSR-E 海面风速数据,利用 Wanninkhof 等于 2009 年提出的包含线性、平方、立方项的海面风速与气体传输速率混合关系模型计算海水施密特数为 660 时的海气界面气体传输速率  $k_{660}$ 。通过回归分析,得到由星载激光雷达数据反演  $k_{660}$  的关系模型。将激光雷达数据反演结果与采用 4 种典型海面风速关系模型的计算结果进行比较,给出由星载激光雷达数据反演的 4 个月平均的海气界面气体传输速率全球分布图和纬度分布图。研究表明,CALIPSO 星载激光雷达 532 nm 单脉冲测量数据可用于反演海气界面气体传输速率。

**关键词** 遥感;星载激光雷达;海面后向散射;海气界面气体传输速率;海面波浪均方斜率

**中图分类号** P733.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0928001

## Estimation of Air-Sea Gas Transfer Velocity Using the CALIPSO Lidar Measurements

Wu Dong Wang Jianhua Yan Fengqi

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China,  
Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract** Four months (January, April, July and October, 2007) of the cloud-aerosol lidar and infrared path finder satellite observations (CALIPSO) lidar 532 nm cloud-free nighttime L1 data (Version 3.01) are used to derive sea surface backscattering coefficient and calculate sea surface mean square wave slope. The collocated AMSR-E sea surface wind speed data are used to calculate air-sea gas transfer velocity at a Schmidt number of 660 using a hybrid model, containing mixed relation between sea surface wind speed with linear, quadratic and cubic terms and gas transfer velocity, proposed by Wanninkhof et al. in 2009. Based on regression analysis, an improved expression for estimating the air-sea gas transfer velocity using satellite lidar measurements is derived and presented. Air-sea gas transfer velocities derived from the CALIPSO lidar data are then compared with that computed from four typical wind speed-transfer velocity relations using the collocated AMSR-E sea surface wind speed data. Global and latitudinal distributions of air-sea gas transfer velocity derived from the four months of CALIPSO lidar data are presented. The results show that the CALIPSO lidar 532 nm single shot data can be used to estimate air-sea gas transfer velocity.

**Key words** remote sensing; CALIPSO lidar; sea surface backscattering; air-sea gas transfer velocity; mean square wave slope

**OCIS codes** 010.0280; 010.1285; 010.1350; 280.1350; 280.3640

## 1 引 言

气候变化是当今国际社会面临的最大的环境挑战。全球变暖直接威胁着人类的生存环境,是目前气候变化的一个主要论题。二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的排放是温室气体的主要来源<sup>[1,2]</sup>,占地球表面积 71%的

海洋可实现对大气 CO<sub>2</sub> 浓度的调控,其中海气间 CO<sub>2</sub> 的交换起着重要作用。因此,研究海气间 CO<sub>2</sub> 交换通量的监测方法及变化规律有着重要的科学意义和社会意义。

海气 CO<sub>2</sub> 交换通量的估算方法有很多,其中海

收稿日期: 2012-03-20; 收到修改稿日期: 2012-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(41076116, 40876017)资助课题。

作者简介: 吴 东(1964—),男,博士,教授,主要从事海洋光学与激光探测方面的研究。E-mail: dongwu@ouc.edu.cn

气界面  $\text{CO}_2$  分压差法是当前测量和估算海气  $\text{CO}_2$  交换通量最常用的方法,也是全球海气  $\text{CO}_2$  交换通量卫星遥感通常采用的方法<sup>[3~11]</sup>。海气界面  $\text{CO}_2$  交换通量  $F$  通常表示为海气界面气体传输速率  $k$ 、 $\text{CO}_2$  在海水中的溶解度  $L$  和海气界面  $\text{CO}_2$  分压差  $\Delta p(\text{CO}_2)$  的乘积<sup>[12]</sup>,卫星遥感的基本思路是通过间接手段测定这些参量来估算海气  $\text{CO}_2$  交换通量。

由于大气和海水的  $\text{CO}_2$  分压测量方法相对成熟可靠,气体传输速率的估计是采用海气界面  $\text{CO}_2$  分压差法估算海气界面  $\text{CO}_2$  交换通量的关键<sup>[4]</sup>。 $\text{CO}_2$  海气界面气体传输速率受到近表层水温变化、盐度变化、碎浪、气泡、湍流、生物活动、海面风速和大气边界层性质等多种因素的影响。目前的研究认为海面风速是影响界面气体传输速率的主导因素,迄今为止已提出许多经验公式<sup>[12~18]</sup>。这些经验公式之间可能存在一定差异,特别是在高风速时差异较大。

Jähne 等<sup>[19]</sup>于 1984 年的实验结果、Hara 等<sup>[20]</sup>于 1995 年的实验结果、Bock 等<sup>[21]</sup>于 1999 年的实验结果以及 Frew 等<sup>[22]</sup>于 2004 年沿海船测的结果均表明气体传输速率与海面波浪全波均方斜率和短波均方斜率呈现较好的线性关系,短波波浪对气体交换起着非常重要的作用。Frew 等<sup>[22]</sup>认为相对于采用风速平方关系模型计算气体传输速率的结果,当海水表面存在表面膜的情况下,利用均方斜率计算气体传输速率不会出现结果过高估计的情况,采用均方斜率计算气体传输速率要优于采用风速计算。

2008 年 Hu 等<sup>[23]</sup>采用云-气溶胶激光雷达和红外探测器观测卫星 (CALIPSO) 激光雷达数据进行海面均方斜率测量进而取得海面风速测量的初步研究结果。2010 年 Hu<sup>[24]</sup>在第 25 届国际激光雷达会议 (ILRC25) 上指出,海面均方斜率可由星载激光雷达精确测量,在精确校正大气双程透射率的条件下可提高海面均方斜率测量的质量。星载激光穿透概率分析表明,占总数据 55.6% 的单脉冲激光数据可以用来探测海面信息<sup>[25,26]</sup>。相对于微波雷达, CALIPSO 星载激光雷达的发射光波长为 532 nm 和 1064 nm,远小于海表波浪波长,因此由其测量得到的海面均方斜率为海面全波均方斜率。

本文采用最新版本 (Version 3.01) 的 CALIPSO Level 1 数据提取激光海面信号,同时采用对应的 Level 2 气溶胶光学厚度 (AOD) 数据进行大气双程透射率的校正,得到全球海面均方斜率分布。采用与 CALIPSO 同轨道且准同步的 AMSR-E 的海面风速数据利用经典的海面风速关系模型来

反演海气界面气体传输速率,用于回归分析和对比。探索建立由星载激光雷达数据反演海气界面气体传输速率的关系模型,得到一些初步结果。

## 2 估算原理

CALIPSO 的激光雷达系统 (CALIOP),接近垂直地面发射 532 nm 和 1064 nm 双波长激光脉冲,具有 3 个接收通道,分别接收 532 nm 的两个正交偏振后向散射信号和 1064 nm 后向散射信号,归一化激光雷达方程表示为

$$\beta'(z) = \beta(z) T^2(z), \quad (1)$$

$$T^2(z) = \exp\left[-2 \int_z^{z_{\text{sat}}} \sigma(z') dz'\right], \quad (2)$$

式中  $z$  为海拔高度,  $z_{\text{sat}}$  为卫星的海拔高度,  $\sigma$  为消光系数。于是激光海面后向散射系数

$$\gamma = \beta(0) = \beta'(0)/T^2(0), \quad (3)$$

而激光海面后向散射系数与海面均方斜率的关系为<sup>[23,27~29]</sup>

$$\gamma = \frac{\rho}{4\pi\sigma^2 \cos^4\theta} \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

式中  $\gamma$  为激光海面后向散射系数,  $\rho$  为海面 Fresnel 反射率,对于 532 nm 通道  $\rho \approx 0.0209$ ,对于 1064 nm 通道  $\rho \approx 0.0193$ ;  $\theta$  为激光发射角;  $\sigma^2$  为具有统计意义的反映海面粗糙程度的海面均方斜率。因此,只要由 CALIPSO 星载激光雷达 Level 1 数据提供的激光测量值正确确定海面反射信号  $\beta'$ ,再进行双程大气透射率  $T^2$  校正,即可获得激光海表面后向散射系数,进而测得海面全波均方斜率。

海气界面气体传输速率与海面波浪均方斜率的关系, Bock 等<sup>[21]</sup>于 1999 年发表的水槽实验结果显示,海浪波数范围为 50~1200 rad/m 时两者呈现良好的线性关系。Frew 等<sup>[22]</sup>于 2004 年的沿海海气化学通量实验结果表明,海浪波数范围为 40~800 rad/m,  $\text{CO}_2$  在 20 °C 海水中的施密特数 (Schmidt number)  $S_c = 660$  时的海气界面气体传输速率  $k_{660}$  可由 (5) 式计算,即

$$k_{660} = 1.1 + 7.3 \times 10^2 \sigma^2 \text{ (cm/h)}. \quad (5)$$

$S_c$  是海表温度  $t$  (°C) 的函数<sup>[12]</sup>,即

$$S_c = A - Bt + Ct^2 - Dt^3. \quad (6)$$

对于  $\text{CO}_2$ ,  $A = 2073.1$ ,  $B = 125.62$ ,  $C = 3.6276$ ,  $D = 0.043219$ 。 $k_{660}$  与气体传输速率  $k$  的关系为

$$k = k_{660} \left(\frac{S_c}{660}\right)^{-1/2}. \quad (7)$$

由于风浪槽在模拟复杂海洋环境的局限性,尤

其是器壁对海面波浪的影响、有限槽深对长波风浪的抑制作用以及缺乏海面白帽等, Frew 等<sup>[30]</sup>的后续研究认为其在沿海实验观测是研究气体传输速率的最佳选择, 因此本文选择(5)式来估算气体传输速率。于是(1)~(7)式给出了由 CALIPSO 卫星激光雷达信号估算海气界面气体传输速率  $k$  的方法。

通常认为海面风速是影响海气界面气体传输速率的主导因素, 通过建立气体传输速率与海面上 10 m 处风速的关系 ( $k-U$  关系) 来计算气体传输速率, 目前多种  $k-U$  关系模型是将现场实测海气界面气体传输速率与船只、浮标测得的风速数据对比建模而成。典型的  $k-U$  关系模型有 1986 年 Liss 等<sup>[13]</sup>提出的分段线性关系(LM1986), 即

$$k_{600} = \begin{cases} 0.17U_{10}, & U_{10} < 3.6 \text{ m/s} \\ 2.85U_{10} - 9.65, & 3.6 \text{ m/s} \leq U_{10} < 13 \text{ m/s} \\ 5.9U_{10} - 49.3, & U_{10} \geq 13 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $k_{600}$  为  $\text{CO}_2$  在  $20^\circ\text{C}$  淡水中的施密特数  $S_c = 600$  时的气体传输速率,  $U_{10}$  为海面上 10 m 处风速。1992 年 Wanninkhof<sup>[12]</sup> 提出适用于稳定或短期风速的平方关系(W1992), 即

$$k_{600} = 0.31U_{10}^2, \quad (9)$$

2000 年 Nightingale 等<sup>[17]</sup> 提出线性加平方的组合关系(NEA2000), 即

$$k_{600} = 0.333U_{10} + 0.222U_{10}^2, \quad (10)$$

以及 2001 年 McGillis 等<sup>[18]</sup> 提出的立方关系(MEA2001), 即

$$k_{600} = 3.3 + 0.02U_{10}^3. \quad (11)$$

(5)、(7)~(11)式中气体传输速率  $k$  的单位为  $\text{cm/h}$ ,  $U_{10}$  的单位为  $\text{m/s}$ 。  $k_{600}$  和  $k$  之间的转化式为

$$k_{600} = k \left( \frac{600}{660} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

2007 年 Frew 等<sup>[30]</sup> 采用双频卫星高度计数据反演海气界面气体传输速率, 采用了上述 4 种  $k-U$  关系模型的估算结果作为对比参考。参照此文献, 本文也选用这 4 种具有代表性的  $k-U$  关系模型并采用与 CALIPSO 同轨道且准同步的 AMSR-E 的海面风速数据来估算气体传输速率, 并统一转化为  $k_{600}$  作为对比。

## 3 海面气体传输速率估算

### 3.1 数据

采用 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月新版 (Version 3.01) 的 CALIPSO 星载激光雷达 Level 1 产品的夜

间无云数据获取激光海面信号, 采用对应的 Version 3.01 星载激光雷达 5 km Level 2 分层气溶胶产品数据获取匹配的大气气溶胶光学厚度数据, 以便对大气气溶胶的衰减进行校正, 同时还应用了相应的 5 km Level 2 分层云产品数据, 以剔除有云数据和统计分析。

由于 Aqua 卫星和 CALIPSO 卫星都是 A-train 系列卫星成员, 轨道相同, 前后仅有 75 s 的时间差, 于是本文采用与 CALIPSO 星载激光雷达数据相对应的 Aqua 卫星的 AMSR-E 海面风速数据作为对比数据源, 并采用 AMSR-E 的日平均降水概率数据辅助 CALIPSO 数据筛选, 同时在计算气体传输速率  $k$  时利用 AMSR-E 的海表温度 (SST) 数据计算施密特数。

### 3.2 数据预处理与海气界面气体传输速率式估算

选取夜间无云且较为清洁的大气环境下的星载激光雷达数据, 以获得质量良好的海面信号, 减少大气校正的复杂性。选取大气后向散射积分 (IAB) 和气溶胶双向透射率  $T_a^2$  呈线性关系区域的数据作为分析对象, 将筛选条件限定为 IBC 小于  $0.017 \text{ sr}^{-1}$ , 同时  $T_a^2$  在 0.8 以上<sup>[31]</sup>。

通过对 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月 CALIPSO 星载激光雷达 Level 2 分层云产品数据以及相匹配的 AMSR-E 降水概率数据的统计分析, 在 CALIPSO 云产品中標示为无云的数据点中, 有 1.52% 的数据在相匹配的 AMSR-E 数据中降水概率标示为非 0, 即 AMSR-E 在观测时存在降雨可能。由于降雨会促进海气界面气体交换<sup>[32~34]</sup>, 因此在数据筛选时依靠匹配的 AMSR-E 降水概率数据剔除这些降水概率标示为非 0 的数据点。

选用 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月的 CALIPSO 星载激光雷达 Level 1 产品 532 nm 单脉冲测量夜间数据, 期望能够将一年内四季的变化统计在内, 经过数据筛选后, 采用 Hu 等<sup>[23]</sup> 的方法提取单脉冲激光海面信号 (单脉冲信号的海面间距 333 m, 光斑直径 70 m<sup>[35, 36]</sup>)。然后经过大气双程透射率校正, 可以得到单脉冲激光海面后向散射系数  $\gamma$ 。由 (4) 式可得海面均方斜率  $\sigma^2$ , 再由海面均方斜率  $\sigma^2$  经 (5)~(7) 式依次算得  $S_c = 660$  时的气体传输速率  $k_{600}$  和气体传输速率  $k$ 。

为了检验由 CALIPSO 星载激光雷达数据反演气体传输速率  $k_{600}$  和  $k$  的准确性, 参照 Frew 等<sup>[30]</sup> 的方法, 选用 4 种具有代表性的  $k-U$  关系模型即 (8)~(11) 式进行计算比较, 这 4 种模型分别用 LM1986、

W1992、NEA2000 和 MEA2001 表示。采用与 CALIPSO 同轨道且准同步的 AMSR-E 的海面风速数据代入这 4 种模型估算气体传输速率,并统一转化为  $k_{660}$  作为参考。图 1 给出对比结果,将对数数据点出现次数  $N$  取以 10 为底的对数,用不同颜色表示。由图 1 可以看出,在 4 种典型风速关系模型的  $k_{660}$  (横轴) 小于 30 的区域, CALIPSO 激光雷达测量的  $k_{660}$  大于 4 种典型风速关系模型的结果,并且此差距随着  $k_{660}$  的减小而增大;在  $k_{660}$  (横轴) 大于 30 的区域,随着  $k_{660}$  (横轴) 的增大 CALIPSO 激光雷达测量的  $k_{660}$  迅速饱和。这是由于:1) 在高风速情况下 CALIPSO 激光雷达测量的海面波浪均方斜

率有问题,需要对高海况下白帽等因素的影响进行校正。2) 选用的气体传输速率与波浪均方斜率的关系模型,即(5)式,决定了这一特征,而且这是主要原因。采用同样的 AMSRE 风速值,利用 Wu<sup>[37]</sup> 于 1990 提出的海面波浪均方斜率与海面 10 m 风速的关系,计算海面波浪均方斜率,再经(5)式计算  $k_{660}$  与用 4 种典型风速关系模型估算的  $k_{660}$  作出对比曲线,在图 1 中用黑实线表示。可以看出,数据分布趋势与黑实线一致,说明这一特征主要由(5)式决定。为此需要探索建立新型的海面波浪均方斜率与气体传输速率关系模型。

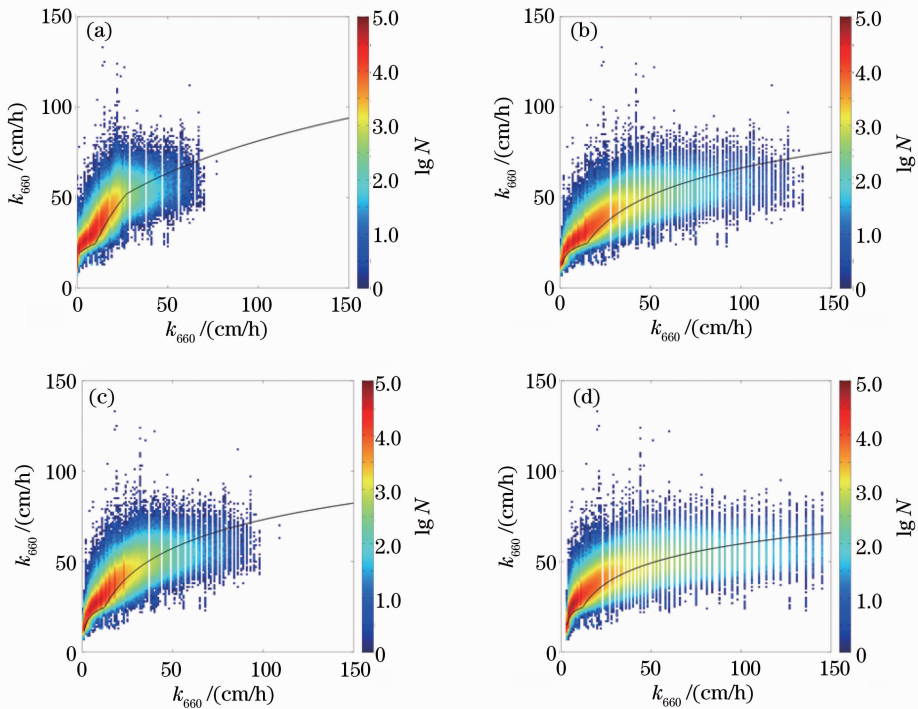


图 1 由 CALIPSO 激光雷达数据用(5)式模型得到的气体传输速率与由准同步的 AMSR-E 海面风速数据经 4 种  $k-U$  关系模型得到的气体传输速率的对比图。(a) LM1986; (b) W1992; (c) NEA2000; (c) MEA2001

Fig.1 Comparison of air-sea gas transfer velocity  $k_{660}$  derived from the CALIPSO lidar measurements using Eq. (5) with that computed from 4  $k-U$  relations using the collocated AMSR-E sea surface wind speed data. (a) LM1986; (b) W1992; (c) NEA2000; (c) MEA2001

### 3.3 激光雷达信号测量的海面波浪均方斜率与气体传输速率关系模型的建立

Wanninkhof 等<sup>[38]</sup> 于 2009 年给出了包含风速线性、平方和立方项的混合关系模型,即

$$k_{660} = 3 + 0.1U_{10} + 0.064U_{10}^2 + 0.011U_{10}^3, \quad (13)$$

该模型综合考虑了多种典型模型的特点,引入零风速时 3 cm/h 的非零气体交换值,同时考虑了体现气体交换与海表风应力、海表动量通量关系平方关系

模型,考虑了在中低风速时体现能量耗散对气体交换的作用并且高风速时体现气泡对气体交换显著促进作用的立方关系模型。因此,本文基于(13)式建立了新型的海面波浪均方斜率与气体传输速率关系模型。

仍然采用 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月的 CALIPSO 星载激光雷达 Level 1 产品 532 nm 单脉冲测量夜间数据,计算海面均方斜率  $\sigma^2$ 。将准同步的 AMSR-E 风速经(13)式用于计算气体传输速率

$k_{660}$ 。图 2 给出反映两者之间关系的三维直方统计图。对两者进行回归分析,得到由星载激光雷达数

据获取的海表波浪均方斜率反演气体传输速率  $k_{660}$  的关系模型,即

$$k_{660} = \begin{cases} 1.57 \times 10^6 \langle \sigma^2 \rangle^{3.86} + 2.92 \text{ (cm/h)}, & \sigma^2 < 0.04 \\ 1.67 \times 10^6 \langle \sigma^2 \rangle^{4.05} + 5.58 \text{ (cm/h)}. & \sigma^2 \geq 0.04 \end{cases} \quad (14)$$

图 2 中黑色曲线为(14)式关系曲线。拟合数据与由(14)式算得的  $k_{660}$  的平均偏差为 0.53 cm/h,标准偏差为 7.1 cm/h,相关系数为 0.77。

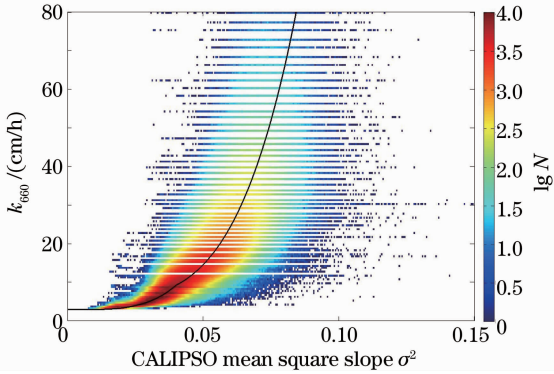


图 2 CALIPSO 激光雷达 532 nm 单脉冲激光海面后向散射获得的海面均方斜率  $\sigma^2$  与由同步匹配 AMSR-E 海面风速计算的气体传输速率  $k_{660}$  间关系的三维直方统计图

Fig. 2 Three-dimensional histogram of mean square wave slope derived from the CALIPSO lidar 532 nm single shot sea surface backscattering versus air-sea gas transfer velocity calculated from the collocated AMSR-E sea surface wind speed

需要指出的是,在高速 ( $U_{10} > 12$  m/s) 情况下,海水表面气泡对气体交换起到显著的促进或主要作用,海面白帽内激光的多次散射效应造成信号的退偏现象,同大气气溶胶对信号的退偏一样,对激光雷达信号的影响增大<sup>[39,40]</sup>,来自海水体的散射也不可忽视<sup>[41]</sup>。因而星载激光雷达获取的海表波浪

均方斜率存在偏差,需进行白帽及水下次表层水体散射影响的校正。由于所提取的海表波浪均方斜率均未进行白帽校正,(14)式在  $U_{10} > 12$  m/s 情况下不能精确适用。在 2007 年 4 个月数据中, $U_{10} > 12$  m/s 的数据约占整个数据总量的 5.7%。

### 3.4 激光雷达信号估算气体传输速率

用新模型(13)式替代(5)式,采用相同的激光雷达数据,重新计算气体传输速率  $k_{660}$ 。同样采用(8)~(11)式 4 种具有代表性的  $k-U$  关系模型的计算结果进行比较检验。图 3 为 4 个月总数据集的对比结果,色标定义与图 1 相同。剔除掉  $U_{10} > 12$  m/s 的数据后,误差降低相关系数提高。表 1 给出剔除掉  $U_{10} > 12$  m/s 的数据前后对应的误差和相关系数。

根据(13)式由 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月 CALIPSO 激光雷达 532 nm 单脉冲激光夜间无云数据获得的平均  $k_{660}$  的全球分布图如图 4(a)所示,纬度分布图如图 4(b)所示。全球分布图中陆地为黑色,色标表示该区内  $k_{660}$  数值的大小,单位为 cm/h,该图分辨率为  $1^\circ \times 2^\circ$ 。纬度分布图与 Glover 等<sup>[42]</sup>于 2007 年给出的 1993 年至 2004 年 12 年平均气体传输速率纬度分布相似,由图 4(b)可以看出,气体传输速率  $k_{660}$  基本上呈现以赤道为中心南北纬对称的关系,赤道地区数值最低,向两极逐渐增加,峰值出现在南北纬  $50^\circ$  附近,原因是此纬度附近海洋风区最大。而北纬区域数值低于南纬地区是因为大陆板块的存在造成风区断裂,南纬更高纬度地区数值迅速下降是由于浮冰覆盖。

表 1 CALIPSO 激光雷达数据反演  $k_{660}$  与由准同步的 AMSR-E 海面风速数据采用 4 种典型海面风速关系模型计算结果比较

Table 1 Comparison of  $k_{660}$  derived from CALIPSO lidar data and the results computed from four typical wind speed-transfer velocity relations model using collocated AMSR-E sea surface wind speed data

	Mean deviation / (cm/h)		Standard deviation / (cm/h)		Correlation coefficient	
	Total	$U_{10} < 12$ m/s	Total	$U_{10} < 12$ m/s	Total	$U_{10} < 12$ m/s
LM1986	3.0	2.0	7.5	3.3	0.75	0.83
W1992	-3.4	3.4	8.0	5.2	0.77	0.84
NEA2000	-0.6	-1.1	7.2	3.7	0.77	0.84
MEA2001	-2.3	-1.9	9.1	4.8	0.76	0.82

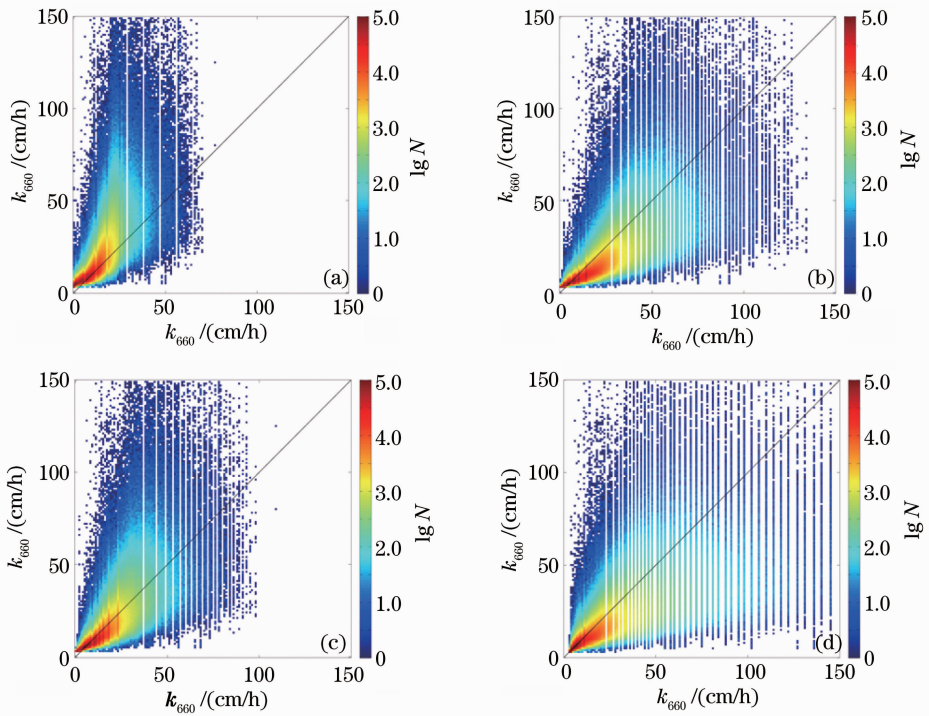


图 3 由 CALIPSO 激光雷达数据用(13)式得到的气体传输速率与由准同步的 AMSR-E 海面风速数据经 4 种  $k-U$  关系模型得到的气体传输速率的对比图。(a) LM1986; (b) W1992; (c) NEA2000; (d) MEA2001

Fig. 3 Comparison of air-sea gas transfer velocity  $k_{660}$  derived from CALIPSO lidar measurements using Eq. (13) with that computed from four  $k-U$  relations using collocated AMSR-E sea surface wind speed data. (a) LM1986; (b) W1992; (c) NEA2000; (d) MEA2001

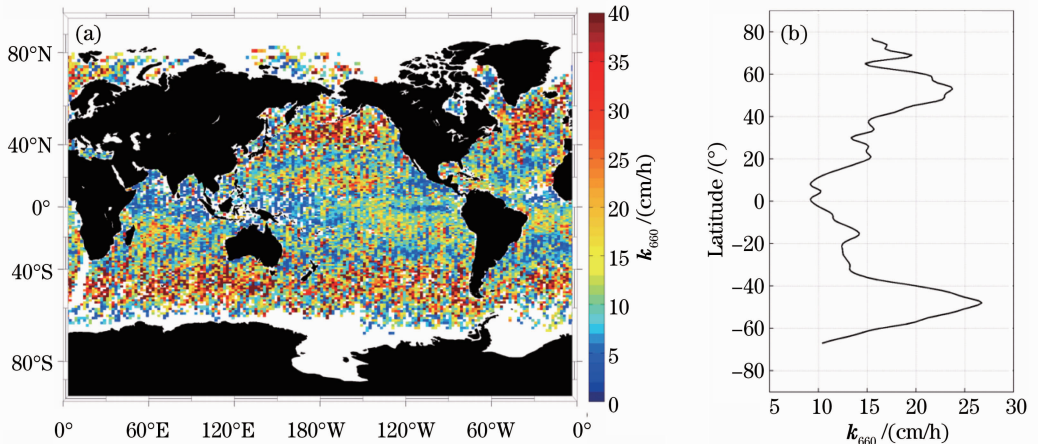


图 4 由 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月 CALIPSO 激光雷达 532 nm 单脉冲激光夜间无云数据获得的平均  $k_{660}$  的全球分布图(a)和纬度分布图(b)

Fig. 4 Global (a) and latitudinal (b) distribution of mean  $k_{660}$  derived from the CALIPSO lidar 532 nm single shot cloudless night data for 4 months of January, April, July and October, 2007

图 5(a)为采用与 CALIPSO 同轨道且准同步的 AMSR-E 的海面风速数据代入(8)~(11)式 4 种典型  $k-U$  关系模型获得的 4 个月平均  $k_{660}$  的纬度分布图,图 5(b)是同时采用准同步的 AMSR-E 海面温

度数据经(6)式和(7)式计算的 4 个月平均气体传输速率  $k$  的纬度分布图(彩图请见网络电子版)。纬度分布图中黑色曲线为激光雷达测量结果,青、蓝、绿、红四色曲线分别对应 4 种典型模型 LM1986、

W1992、NEA2000 和 MEA2001 计算得到的结果。由图 5 可以看出,激光雷达测量结果随纬度的变化趋势与 4 种典型模型的计算结果基本一致,数值上

激光雷达测量值大于模型 LM1986 的计算值,小于模型 W1992 和 MEA2001 的计算值,与模型 NEA2000 的计算值接近。

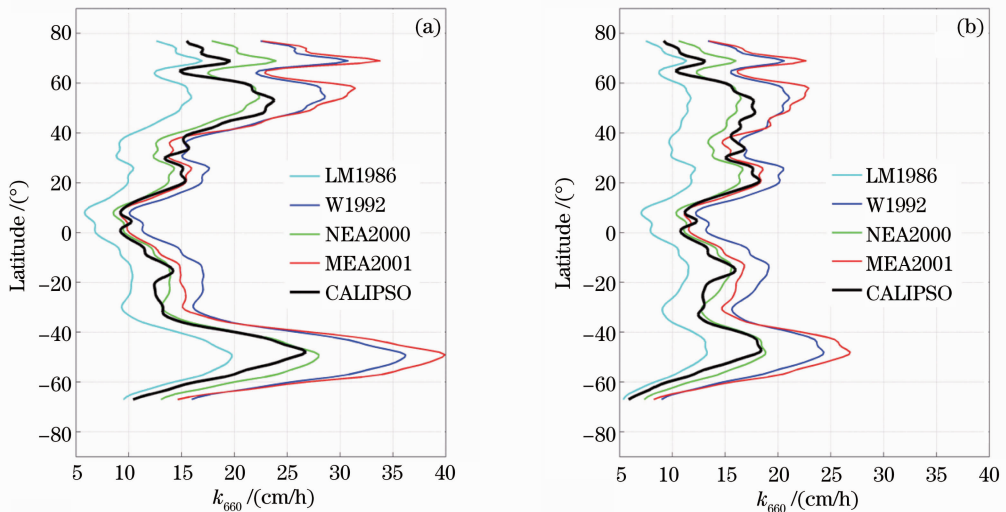


图 5 由 2007 年 1、4、7、10 月 4 个月 CALIPSO 激光雷达 532 nm 单脉冲激光夜间无云数据获得的平均  $k_{660}$  的纬度分布图(a)和平均气体传输速率  $k$  的纬度分布图(b)

Fig. 5 Latitudinal distribution of mean air-sea gas transfer velocity  $k_{660}$  (a) and  $k$  (b) derived from CALIPSO lidar 532 nm single shot cloudless night data for 4 months of January, April, July and October, 2007

## 4 结 论

初步研究结果表明,CALIPSO 星载激光雷达 532 nm 单脉冲(地面光斑直径 70 m)激光夜间无云数据经大气双程透射率校准可获得表征海面粗糙度的海面波浪均方斜率,因为激光波长远小于海面波浪波长,获得的均方斜率为海面波浪全波数均方斜率。进而可以实现对高分辨率海气界面气体传输速率的估算。

由激光雷达信号估算海气界面气体传输速率,海面波浪均方斜率与气体传输速率关系模型非常关键。利用准同步 AMSR-E 海面风速数据并采用 Wanninkhof(2009)的混合关系模型<sup>[38]</sup>计算  $k_{660}$ ,与由 CALIPSO 星载激光雷达测得的海面波浪均方斜率进行回归分析,拟合得到由星载激光雷达数据反演气体传输速率  $k_{660}$  的指数关系模型。采用该模型用激光雷达数据估算的气体传输速率  $k_{660}$ ,在中低风速段与模型 LM1986、W1992、NEA2000 和 MEA2001 计算结果的标准偏差分别为 3、3、5、7、3、7、4、8 cm/h,相关系数为 0.82~0.84。所计算的 2007 年 4 个月平均  $k_{660}$  的纬度分布、 $k_{660}$  随纬度的变化趋势与 4 种典型模型的计算结果基本一致。

在高风速段( $U_{10} > 12$  m/s),利用 CALIPSO 星载激光雷达 532nm 单脉冲激光数据估算海气界面

气体传输速率未考虑高风速时海面气泡对气体传输的增强作用,模型有待改进。

**致谢** 感谢美国国家航空航天局兰利研究中心的大气科学数据中心(ASDC)提供的 CALIPSO 激光雷达观测数据。

## 参 考 文 献

- 1 Fu Congbin. Facing the Challenges of Climate Change [M]. Beijing: Science Press, 2008
- 符淙斌. 面对气候变暖的挑战 [M]. 北京:科学出版社, 2008
- 2 Wei Yiming, Liu Lancui, Fan Ying *et al.*. China Energy Report (2008): CO<sub>2</sub> Emission Research [M]. Beijing: Science Press, 2008
- 魏一鸣, 刘兰翠, 范英等. 中国能源报告(2008):碳排放研究 [M]. 北京:科学出版社, 2008
- 3 Y. Rangama, J. Boutin, J. Etcheto *et al.*. Variability of the net air-sea CO<sub>2</sub> flux inferred from shipboard and satellite measurements in the southern ocean south of tasmania and new zealand [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(1-17): C9005
- 4 Lu Zhongming, Dai Minhan. Advances in air-sea CO<sub>2</sub> flux study and the application of eddy covariance technique [J]. *Advanced in Earth Science*, 2006, **21**(10): 1046~1057
- 鲁中明, 戴民汉. 海气 CO<sub>2</sub> 通量与涡动相关法应用研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(10): 1046~1057
- 5 Xu Suqing, Chen Liqi. Implications for estimating air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the southern ocean based on satellite data and in situ investigations [J]. *Chinese J. Polar Research*, 2007, **19**(2): 151~157
- 许苏清, 陈立奇. 利用卫星数据估算南大洋海-气 CO<sub>2</sub> 通量的展

- 望[J]. 极地研究, 2007, **19**(2): 151~157
- 6 Sun Heng, Gao Zhongyong. Advances in the study of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the southern ocean [J]. *Chinese J. Polar Research*, 2009, **21**(1): 60~68
- 孙 恒, 高众勇. 南大洋海-气 CO<sub>2</sub> 通量研究进展[J]. 极地研究, 2009, **21**(1): 60~68
- 7 X. A. Padin, G. Navarro, M. Gilcoto *et al.*. Estimation of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the Bay of Biscay based on empirical relationships and remotely sensed observations [J]. *J. Mar. Sys.*, 2009, **75**(1-2): 280~289
- 8 M. Chiericia, A. Olsen, T. Johannessen. Algorithms to estimate the carbon dioxide uptake in the northern North Atlantic using shipboard observations, satellite and ocean analysis data [J]. *Deep-Sea Res. II*, 2009, **56**(8-10): 630~639
- 9 F. D'Ortenzio, D. Antoine, S. Marullo. Satellite-driven modeling of the upper ocean mixed layer and air-sea CO<sub>2</sub> flux in the Mediterranean sea [J]. *Deep-Sea Res. I*, 2008, **55**(4): 405~434
- 10 B. G. T. Else, J. J. Yackel, T. N. Papakyriakou. Application of satellite remote sensing techniques for estimating air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in Hudson Bay, Canada during the ice-free season [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2008, **112**(9): 3550~3562
- 11 R. Wanninkhof, A. Olsen, J. Triñanes. Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the Caribbean Sea from 2002-2004 [J]. *J. Mar. Sys.*, 2007, **66**(1-4): 272~284
- 12 R. Wanninkhof. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(C5): 7373~7382
- 13 P. S. Liss, L. Merlivat. Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis [C]. *The Role of Air-Sea Gas Exchange in Geochemical Cycling*, 1986. 113~127
- 14 P. P. Tans, I. Y. Fung, T. Takahashi. Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget [J]. *Science*, 1990, **247**(4949): 1431~1438
- 15 R. Wanninkhof, W. R. McGillis. A cubic relationship between air-sea CO<sub>2</sub> exchange and wind speed [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**(13): 1889~1892
- 16 C. M. J. Jacobs, W. Kohsiek, W. A. Oost. Air-sea fluxes and transfer velocity of CO<sub>2</sub> over the North Sea; result from ASGAMAGE [J]. *Tellus B*, 1999, **51**(3): 629~641
- 17 P. D. Nightingale, G. Malin, C. S. Law *et al.*. In situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 2000, **14**(1): 373~387
- 18 W. R. McGillis, J. B. Edson, J. E. Hare *et al.*. Direct covariance of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(C8): 16729~16745
- 19 B. Jähne, W. Huber, A. Dutzi *et al.*. Wind/wave-tunnel experiment on the Schmidt number and wave field dependence of air/water gas exchange [J]. *Gas Transfer at Water Surfaces*, 1984. 303~309
- 20 T. Hara, E. J. Bock, N. M. Frew *et al.*. Relationship between air-sea gas transfer velocity and surface roughness [J]. *Air-Water Gas Transfer*, 1995. 611~616
- 21 E. J. Bock, T. Hara, N. M. Frew *et al.*. Relationship between air-sea gas transfer and short wind waves [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(C11): 25821~25831
- 22 N. M. Frew, E. J. Bock, U. Schimpf *et al.*. Air-sea gas transfer: its dependence on wind stress, small-scale roughness, and surface films [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(8): C08S17
- 23 Y. Hu, K. Stamnes, M. Vaughan *et al.*. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2008, **8**(1): 2771~2793
- 24 Y. Hu. Improving ocean-atmosphere carbon flux estimates with lidar measurements of ocean subsurface and ocean-atmospheric interaction [C]. The 25th International Laser Radar Conference (ILRC 25), St. Petersburg, Russia, 2010
- 25 D. Wu, Y. Hu, M. P. McCormick *et al.*. Global cloud layer distribution statistics from one year's CALIPSO lidar observations [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2011, **32**(5): 1269~1288
- 26 Wu Dong, Jia Jia. Global penetrability statistics of CALIPSO over ocean laser samples [J]. *J. Atmos. Environ. Opt.*, 2011, **6**(4): 252~259
- 吴 东, 贾 佳. CALIPSO 星载激光在全球海洋上空的穿透性统计[J]. 大气与环境光学学报, 2011, **6**(4): 252~259
- 27 J. K. Bufton, F. E. Hoge, R. N. Swift. Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(17): 2603~2618
- 28 R. T. Menzies, D. M. Tratt, W. H. Hunt. Lidar in-space technology experiment measurements of sea surface directional reflectance and the link to surface wind speed [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5550~5559
- 29 R. S. Lancaster, J. D. Spinhirne, S. P. Palm. Laser pulse reflectance of the ocean surface from the GLAS satellite lidar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(22): L22S10
- 30 N. M. Frew, D. M. Glover, E. J. Bock *et al.*. A new approach to estimation global air-sea gas transfer velocity fields using dual-frequency altimeter backscatter [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(C11): C111003
- 31 Jia Jia. Sea Surface Wind Speed Inversion Based on CALIPSO Aerosol Production [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011
- 贾 佳. 基于 CALIPSO 气溶胶产品 LIDAR 信号校正的海面风速反演[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011
- 32 D. T. Ho, L. F. Bliven, R. Wanninkhof *et al.*. The effect of rain on air-water gas exchange [J]. *Tellus B*, 1997, **49**(2): 149~158
- 33 D. T. Ho, W. E. Asher, L. F. Bliven *et al.*. On mechanisms of rain-induced air-water gas exchange [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(C10): 24045~24057
- 34 S. Komori, N. Takagaki, R. Saiki *et al.*. The effect of raindrops on interfacial turbulence and air-water gas transfer [J]. *Transport at the Air-Sea Interface - Measurements, Models and Parametrizations*, 2007. 169~179
- 35 C. A. Hostetler, Z. Liu, J. Reagan *et al.*. CALIOP algorithm theoretical basis document-calibration and level 1 data products [OL]. Release 1.0, 2006, Document No: PC-SCI-201. [http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/project\\_documentation.php](http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/project_documentation.php)
- 36 D. M. Winker, C. A. Hostetler, M. A. Vaughan *et al.*. CALIOP algorithm theoretical basis document-part 1; CALIOP instrument, and algorithms overview [OL]. Release 2.0, 2006, Document No: PC-SCI-202 Part 1. [http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/project\\_documentation.php](http://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/project_documentation.php)
- 37 J. Wu. Mean square slopes of the wind-disturbed water surface, their magnitude, directionality, and composition [J]. *Radio Science*, 1990, **25**(1): 37~48
- 38 R. Wanninkhof, W. E. Asher, D. T. Ho *et al.*. Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing [J]. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 2009, **1**: 213~244
- 39 Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Skylight polarization patterns based on Mie theory for scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3002~3006
- 黄旭锋, 步 扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3002~3006
- 40 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo *et al.*. Research on the depolarization ratio characteristic of the aerosol in the atmosphere with the CALIPSO satellite data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2943~2951
- 赵一鸣, 江月松, 张绪国 等. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气



溶胶的去偏振度特性分析研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 2943~2951

- 41 Li Zhigang, Oliver Reitebuch, Liu Zhishen. Analysis of sea surface reflectance from airborne lidar experimental measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100505

李志刚, Oliver Reitebuch, 刘智深. 激光海表面反射率的机载实

验分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(s1): s100505

- 42 D. M. Glover, N. M. Frew, S. J. McCue. Air-sea gas transfer velocity estimates from the Jason-1 and TOPEX altimeters: prospects for a long-term global time series [J]. *J. Mar. Sys.*, 2007, **66**(1-4): 173~181

栏目编辑: 何卓铭