

# 海、气 CO<sub>2</sub> 交换过程机制和观测方法研究

张思勃, 姚 伟

(钱学森空间技术实验室 空间科学研究部, 北京 100094)

## 1 引言

CO<sub>2</sub> 是对人类活动导致的气候变化起主要作用的温室气体, CO<sub>2</sub> 通过影响、改变地球的辐射收支平衡来影响地球气候系统。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 依据大气中各温室气体的占比, 整理出每一种人类活动诱发的气候驱动因子所带来的辐射影响, 其中大气中的 CO<sub>2</sub> 具有显著的、更大的辐射影响。大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的增加主要是由化石燃料的燃烧以及毁林等人类活动造成的。基于 1750 年到 2011 年间的观测资料, IPCC 报告总结大气中累积了约 40% 的人为排放的 CO<sub>2</sub>, 剩余人为排放的 CO<sub>2</sub> 被海洋和陆地生态系统吸收了。海洋吸收了人为 CO<sub>2</sub> 排放量的 30%, 因此, 它在平衡 CO<sub>2</sub> 辐射强迫影响中扮演着非常重要的作用。只要大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度持续上升, 由于海洋的高溶解性, 海洋就会持续吸收大气中的 CO<sub>2</sub>。然而, 海洋的吸收率是受限制的, 比如受限于有限的垂直混合速度, 生物活性和海气界面间的复杂过程。随着水中 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, CO<sub>2</sub> 的过饱和性使得海洋对大气中 CO<sub>2</sub> 的吸收率在不断地降低。由于上升的温度会导致海洋分层增加, 因而人类强迫可能会减缓海洋环流, 海表变得更趋于饱和, 反过来会降低海洋中的 CO<sub>2</sub> 吸收效率。

## 2 海、气 CO<sub>2</sub> 交换过程机制

为了更好地理解气候系统对 CO<sub>2</sub> 的响应, 研究决定海、气 CO<sub>2</sub> 交换的过程机制是非常重要的, 以便在大尺度观测量中量化和参数化海气交换过程, 并改进气候模式。

一般来讲, 海气 CO<sub>2</sub> 通量的表达式如下:

$$F = \kappa \alpha (P_{CO_2, water} - P_{CO_2, air}) \quad (1)$$

其中,  $\kappa$  是气体传输速度 ( $\text{cm h}^{-1}$ ),  $\alpha$  是气体在海水中的溶解度 ( $\text{mol m}^{-3} \text{atm}^{-1}$ ),  $P_{CO_2, water} - P_{CO_2, air} = \Delta P_{CO_2}$  ( $\mu\text{atm}$ ) 代表海水和上层空气间的分压差。该等式显示出海气界面的 CO<sub>2</sub> 交换与大气和海洋间的 CO<sub>2</sub> 分压成比例, 以及与气体传输速度成比例。

海气分压差是 CO<sub>2</sub> 通量的热动力驱动强迫项。该分压差的变化主要取决于海水中 CO<sub>2</sub> 分压的变化。大气的  $P_{CO_2}$  变化几乎只取决于陆地植被的季节变化。然而,

这一变化与水中 $P_{CO_2}$ 的季节性变化相比是相对较小的。基本上，海、气分压差主要受海水和大气间总的 $CO_2$ 浓度、pH、总碱性(AT)、温度和盐度控制，同时也会随区域和季节的变化而变化。

传输速度是 $CO_2$ 交换通量的动力驱动因子，代表海、气界面间气体分子的传输速度，主要取决于海、气界面间一阶扰动项的大小。即主要是受海表风速的影响，但同时也会受表面膜、破碎波、雨、边界层稳定性以及气体进入水中的扩散速度（主要取决于表面温度，温度越高扩散越快）。在现有的海、气 $CO_2$ 交换通量估计中，仍有显著的不确定性。这些不确定性影响了时间平均的估计值，特别是时变成分的估计。而不确定性的上升，主要取决于两项因子的变化 $\Delta P_{CO_2}$ 和传输速度 $\kappa$ 。我们对驱动、影响海气气体传输速度 $\kappa$ 的物理过程理解还不充分，本研究主要关注气体传输速度 $\kappa$ 的不确定性，并尝试降低这种不确定性。气体传输速度 $\kappa$ 对风速敏感，同时也对其它因素像表面粗糙度和近表面湍流敏感。另外，表面波、小尺度波破碎、气泡、海表喷气、雨和表面膜也会通过影响传输速度来影响海气界面间的气体交换，而且这些参数也会影响海表粗糙度和近表面湍流。因此，包括表面/界面间参数的 $\kappa$ 系数的参数化方案，也许可以降低海、气气体交换估计中的不确定性。

在过去十年间，通过实验室试验、模式模拟以及场地观测研究等多方的不懈努力，已经提高了气体传输的测量技术和参数化方案。目前，已有多种 $\kappa$ 系数的参数化方案被提了出来，表征 $\kappa$ 系数的多变性以及 $\kappa$ 系数与影响海、气界面的大尺度过程间的相互作用。

传统的海、气气体传输速度参数化方案使用的是仅依赖于风速的简单经验函数。这类基于风速的参数化方案的基本表达式如下：

$$\kappa = au^b(Sc)^n \quad (2)$$

其中， $u$ 是风速， $a$ 和 $b$ 是由实验数据所决定的系数， $Sc$ 是施密特数， $n$ 是一个经验系数，在 $1/2$ （平静海面）和 $2/3$ （粗糙表面）间变化，取决于速度分数和均方根波陡。施密特数 $Sc$ 定义如下：

$$Sc = \text{海水中的粘性系数} / \text{扩散系数} \quad (3)$$

不同的经验公式估计的气体传输速度的变化差异达到一半甚至更多，并导致对海洋 $CO_2$ 碳汇量化的不确定性。这些不确定性在高风速情况下达到最大。超过一半的海洋 $CO_2$ 吸收变化是由气体传输速度参数化方案中不同的风速相关项所造成的，比如从风速的三次方函数变为风速的二次方函数。这些不确定性源自于气体传输速度的依赖项，仅用风速依赖的参数化方案可能不能代表海、气边界层

过程。风速是海、气界面间的主要参数，但并不足以表征所有调节气体传输速度的影响因素。

### 3 海、气 CO<sub>2</sub> 交换通量测量技术

#### 3.1 直接通量测量技术——涡度协方差系统

估计通量最直接的方法就是涡度协方差法（EC），这一方法主要用于地基固定平台上的通量测量。对于移动平台的观测，在使用 EC 方法前，对平台移动所带来影响进行校正是必要的。涡度协方差法假定海洋和大气间的净传输是一维的。在这种假设下，垂直通量密度可以通过垂直风速和参量的扰动波动间的协方差来进行计算。具体参量包括热、质量和动量。为了实现这一方法，利用超声风速计来测量垂直风速，利用红外气体分析仪来测量水汽和 CO<sub>2</sub>。涡度协方差法在陆地生态系统等方面的应用已广泛开展，在海洋方面的应用也正日益受到重视，相关的技术难点逐渐被解决，在船载自动观测方面有很好的应用前景。

#### 3.2 模块法

模块法利用溶解度的测量值（基于海表温度和海洋盐度进行估计），空气和海水的 CO<sub>2</sub> 分压以及传输速度来简化地定义海、气 CO<sub>2</sub> 通量。CO<sub>2</sub> 分压通过一个  $\alpha$  系数可转换成 CO<sub>2</sub> 浓度， $CO_2 = \alpha P_{CO_2}$ ，CO<sub>2</sub> 分压差与大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度有关：

$$\Delta CO_2 = CO_{2,water} - \frac{CO_{2,air}}{H} = \alpha \Delta P_{CO_{2,water}} \quad (4)$$

其中，H 是亨利定律参数。

基于空气、气体和水的物理以及分子的属性，海表温度和盐度的影响在溶解度公式中被加以考虑。理论上，气体分子穿过海、气界面间的运动是由于扩散传输过程所导致的，会受到环境变量的影响。从技术层面看，模块法是相对容易的方法，并且被广泛地应用于气体交换估计中。然而，该方法直接与气体传输速度估计相关，需要被进一步地研究。

#### 3.3 红外成像技术

红外成像技术是用来量化控制海、气气体交换过程的工具，通过利用热能来替代气体示踪，以探索气体穿过海表微层的传输过程。在此方法中，红外辐射计被用来测量海表温度波动，以及热传递过程的特征时间尺度。海表温度的波动显示出传输机制的扰动属性。热传输系数由分子耗散系数  $D_{heat}$ ，和传输过程的时间尺度推导而得：

$$\kappa_{heat} = \sqrt{\frac{D_{heat}}{time}} \quad (5)$$

该方法计算的热传输速度，可以外推用于其它气体，如 CO<sub>2</sub>；其它气体与热能具有简单的成比例关系，就像是用于溶解的气体示踪一样，因此二者的对流传

输速度（粘性系数）是相等的，只是分子传输（扩散系数）不同。因此：

$$\frac{\kappa_{gas}}{\kappa_{heat}} = \left(\frac{D_{gas}}{D_{heat}}\right)^n = \left(\frac{Sc_{gas}}{Sc_{heat}}\right)^{-n} \quad (6)$$

其中  $D$  表示气体和热能在水中的分子扩散系数； $Sc$  是施密特数，取决于粘性系数和分子扩散系数，而参数  $n$  依赖于表面粗糙度，在  $1/2$  到  $2/3$  间变化。

该方法的优势在于热通量可以利用海、气界面上方的遥感方法进行探测，因此在时间尺度上小于 1 分钟的非常快的气体传输速度也可以被探测。

### 3.4 卫星遥感技术

最近，卫星遥感技术被用来参数化方程（1）中的多种成分。用于海、气气体交换通量估计的雷达数据，包括海表温度、海表盐度、海表粗糙度、风速和风向。这些数据被用来决定气体传输速度 $\kappa$ 、溶解度和 $P_{CO_2}$ 。小尺度风浪和近表面湍流对海、气气体交换起主要作用。毛细重力波和气体传输速度是小尺度现象，它们通过粘滞性和表面强度而相互影响。从主动传感器如高度计或散射计发射的信号与海表相互作用，并反射回信号被仪器接收机接收。后向散射信号中包含海表粗糙度信息。

高度计是一个主动雷达，利用其星下点朝向的天线向海表发射脉冲，基于镜面反射点理论来推导海表粗糙度。因为短脉冲与海浪表面相互作用，使得反射回的信号波形不同于发射的信号，因而分析返回信号的波谱可以用来推测海表粗糙度。其中一种算法基于长期的全球平均的 $\kappa_{660}$ ，结果误差在  $16 \text{ cm h}^{-1}$ ，如下：

$$\kappa_{660} = 7000 \left( \frac{0.38}{\sigma_{Ku}^0} - \frac{0.48}{\sigma_C^0 + 0.5} \right) \left( \frac{Sc}{660} \right)^{-0.5} \quad (7)$$

其中 $\sigma^0$ 是标准化的雷达交叉截面（RCS），而其下标  $C$  和  $Ku$  分别代表  $C$ -和  $Ku$ -微波频带。

散射计这类雷达主要被设计用来向地表发射微波短波脉冲以探测基于海表反射能量的雷达交叉截面。微波很难穿透水体，如  $10 \text{ GHz}$  信号穿透厚度约  $2 \text{ mm}$ ，微波设备可以提供我们基于海表特征属性的海气界面信息。一种初步的气体传输速度估计，以 QuickSCAT 散射计测量的逆风的雷达交叉截面为函数，如下：

$$\kappa_{660} = 10^{\frac{(\sigma_{0v} + 47.4079)}{21.4248}} \quad (8)$$

$$\kappa_{660} = 10^{\frac{(\sigma_{0h} + 51.7545)}{22.5334}} \quad (9)$$

其中 $\sigma_{0v}$ 是垂直极化标准化的雷达截面， $\sigma_{0h}$ 是水平极化标准化的雷达截面。

## 4 未来研究方向

精确估计海、气界面间的气体传输速度将增强我们对大气和海洋间  $CO_2$  交换

过程机制的理解,以及增强我们对作为碳汇的海洋的固碳效率的理解。气体交换速度 $\kappa$ 受海表风应力影响,风应力会通过影响海浪和近海表的湍流场来影响气体传输速度。 $\kappa$ 系数的典型参数化方案只是单纯地依赖于风速,然而我们对这一单一强迫的认识仍然不够充分和全面。为了降低 $\kappa$ 系数参数化方案中的不确定性,我们必需要考虑环境强迫以及表面/界面参数对气体传输速度估计的影响,如建立海表粗糙度与气体传输速度间的直接关连等。因为传输速度对小尺度湍流和波破碎的强烈依赖,表面粗糙度和表面风应力或许可以比风速更好地表征气体传输速度。那么就可以利用表面粗糙度与传输速度 $\kappa$ 建立一个比仅依赖风速更佳的面  $\text{CO}_2$  传输估计算法。

海表粗糙度是海表雷达后向散射的一个主要贡献项。微波后向散射对表面粗糙度属性的响应主要依赖于雷达观测参数(频率、极化和入射角)和表面参数(风、表面粗糙度和海水的介电属性)。前人曾经尝试过将海、气  $\text{CO}_2$  通量与雷达后向散射截面数据相关连。在这类研究中,主要是基于早期的高度计数据,气体传输速度表现出与均方根波陡相关,但不考虑表面膜浓度和波的破碎。这一结论使得我们可以更容易地使用雷达技术来推测小尺度的海洋表面粗糙度,并在气体传输参数化方案中用风速取代它。现存的经验化的雷达后向散射截面与由空基、机载或船载的散射计的观测推导而得的海表粗糙度间的关系,受到这些采样观测数据的时、空限制。这一问题制约了有效的风的范围、大气和海洋的状态条件,以及限制了这些经验关系的适用性。未来,我们会基于海表的卫星微波高度计、散射计观测来改进海、气  $\text{CO}_2$  气体传输速度 $\kappa$ 的估计算法。

## 作者简介

张思勃,女,钱学森空间技术实验室助理研究员,南京信息工程大学大气遥感科学与技术专业博士,法国国家气象研究中心博士后,主要研究微波遥感、全球气候变化。

通信地址:北京市海淀区友谊路 104 号,邮编:100094。电话:010-68111349。Email: zhangsibo@qxslab.cn。