

# Langmuir 环流在雷诺平均型模式中的参数化研究进展

仇 颖, 阳德华, 李 爽

(浙江大学海洋学院物理海洋研究所, 浙江 舟山 316000)

**摘要:** Langmuir 环流影响着海洋上层的能量输入, 对海洋上混合层的形成和加深起着重要作用, 对于海洋上混合层具有重要意义。近年来许多学者采用大涡模拟(LES)方法对 Langmuir 环流进行机制研究, 并通过在雷诺平均模型中参数化 Langmuir 环流效应, 将 Langmuir 环流过程引入到三维海洋环流或海洋耦合模式中, 提出了一系列混合参数化方案。本文回顾了 Langmuir 环流在雷诺平均模式参数化中的研究进展, 主要可分为以下几种方案: 一种方法是用 Langmuir 数在 KPP 垂直混合参数化方案中引入湍流特征速度增强因子, 并不断发展 Langmuir 数的定义; 一种是在 Mellor-Yamada2.5 湍流闭合模型中增加斯托克斯漂流剪切效应项, 此外还有通过修改模式中混合长方程来加入 Langmuir 效应等。通过在雷诺平均模式中应用的结果来看, 现有的参数化方案在一定程度上改善了混合层深度和 SST 的模拟, 肯定了 Langmuir 环流在加深混合等方面的作用, 但仍存在一些问题需要在今后的研究中进一步改进。

**关键词:** Langmuir 环流; 参数化; KPP; 大涡模拟

中图分类号: P731.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2019)11-0103-08

DOI: 10.11759/hyxx20190114001

上层海洋的动力主要源于与大气边界层中风的相互作用<sup>[1]</sup>, 风和波浪共同作用下产生了 Langmuir 环流(简称 LC)现象, Langmuir 环流以一系列交替的水平滚动涡旋的形式出现, 其轴线与风大致对齐, 其在湍流的动量、热量和质量转移中发挥着关键性的作用, 是波流相互作用的主要表现形式之一, 因此 Langmuir 环流是上层海洋湍流的重要特征之一。Craig 和 Leibovich 进行了一系列关于 Langmuir 环流基本机制的理论研究<sup>[2-5]</sup>, 指出 Stokes 漂流和风驱水平流的相互作用, 是引起 Langmuir 环流的核心机制, 他们之间的相互作用力, 称为“Stokes-Vortex 力”。McWilliams 等<sup>[6]</sup>在上述 Craig 和 Leibovich(CL)理论的基础上提出了“Langmuir 环流”的理论, 认为上层湍流需要考虑由 Langmuir 环流导致的湍动能增加项, LC 是引起湍流混合的一个重要机制。

近年来, 对于 Langmuir 环流影响下的上层海洋动力混合的研究大多采用大涡模式。LES 能够直接解析大于模拟网格尺度的流动, 仅对次网格部分进行参数化, 大大提高了求解精度, 已成为 Langmuir 环流模拟的有效工具<sup>[7-9]</sup>。McWilliams 等<sup>[6]</sup>对平均动量方程中科里奥利和压力项的修正作出了改进, 提出了 Langmuir 湍流的概念。Skylingstad 和 Denbo<sup>[7]</sup>使用 LES 对有无对流驱动的和有无 Stokes 漂流的混合进行模拟, 垂向速度方差和热通量的增加显示了

Langmuir 环流对海洋上层混合的重要性。一系列研究结果表明在混合层内, LC 极大地增强了垂直混合, 导致温度和速度的均匀分布<sup>[10-14]</sup>, 但是研究表明, 关于 LC 对于混合层加深的作用仍然不是很清晰, 在某些情况下, LC 似乎有助于增强混合层的加深<sup>[15-16]</sup>, 但是 Skylingstad<sup>[17]</sup>使用海表边界层的大涡模拟(LES)湍流模型进行敏感性实验, 结果表明 LC 的影响主要局限于混合层生长的初始阶段。

为了更好地研究 LC 对于上层海洋混合的影响, 尽管其在垂直混合中的作用存在不确定性, 越来越多的学者将 Langmuir 环流因素加入到三维海洋环流模式中进行研究。现有的湍流数值模拟方法有 3 种: 直接数值模拟、大涡数值模拟和雷诺平均模拟。直接数值模拟方法是通过湍流进行直接计算, 不需要简化和近似, 理论上能得到相对准确的计算结果, 但是直接数值模拟方法对计算机内存空间和计算速

收稿日期: 2019-01-14; 修回日期: 2019-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017yfa0604102, 2016yfc1401404); 国家自然科学基金(41876003)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2017yfa0604102, No.2016yfc1401404; National Natural Science Foundation of China, No.41876003]

作者简介: 仇颖, 硕士研究生, 研究方向: 海洋上层混合, E-mail: 21634003@zju.edu.cn; 李爽, 通信作者, 副教授, 研究方向: 物理海洋, E-mail: lshuang@zju.edu.cn

度的要求非常高,目前只能应用于简单流场。雷诺平均模拟方法稳定性相对较好,需要的计算工作量小,是应用较广的湍流数值模拟方法,目前海洋学界常用的雷诺平均模型有 POM、HYCOM、ROMS 等。但是雷诺平均方法只能给出湍流的平均运动和相应的平均物理量,而需要通过模型刻画雷诺应力,且不同的雷诺平均模式缺乏统一性。而由于大涡模拟通过空间平均将湍流分为可解尺度和不可解尺度,在可解尺度上能直接数值求解计算出雷诺应力项,用亚格子尺度模型模拟不可解尺度湍流对可解尺度湍流的影响,因此 LES 结果被用于提供改进现有参数化的思路,以改进这些雷诺平均模型中使用的现有参数化方案。

## 1 雷诺平均模式中现有的垂向混合参数化方案

海洋混合的参数化方案在海洋数值模式中起至关重要作用,不同的参数化方案选取将直接影响数值模拟结果的可靠性,不适用的混合参数化方案将

导致混合强度、温盐分布、水平流动等出现失真的情况。海洋湍流研究的核心目标是开发用于大规模模型的高效、精确的垂直混合参数化方案。现有的湍流垂向参数化方案只是在大尺度运动中模拟了湍流和小尺度的混合效应。在这之中,按照处理 TKE 和长度尺度的方程个数,我们可以将垂向混合参数化方案分为零方程模型、一方程模型、二方程模型。目前比较常用的参数化方案包括 Mellor-Yamada 模型<sup>[19]</sup>,基于 K 理论和湍封闭方法的连续混合层方案例如 K-剖面参数化(KPP, K-profile parameterization)方案等。

## 2 关于在雷诺平均模式中添加 Langmuir 环流作用的模式改进

### 2.1 K-剖面参数化(KPP)

一种广泛使用的参数化方案是 K-剖面参数化(KPP),它以一维垂直剖面的形式模拟涡流黏度和涡流扩散系数。标准 KPP 模型是针对纯风致剪切湍流而开发的,不包括 Langmuir 环流的影响<sup>[20]</sup>。

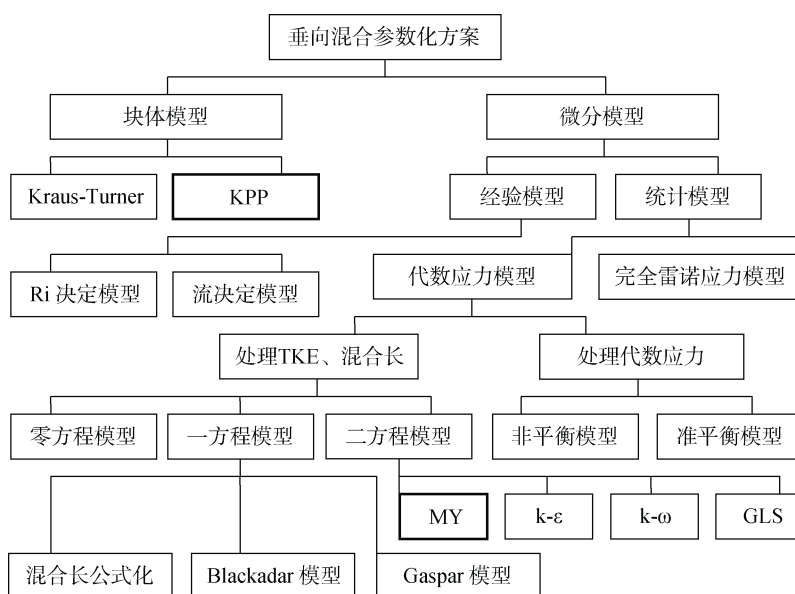


图 1 垂向混合参数化方案的分类

Fig. 1 Types of vertical mixing parameterizations

注: MY: Mellor-Yamada 模式, KPP: K-profile Parameterization 模式, TKE: 湍动能。这张图摘录自 Burchard 等<sup>[18]</sup>的修改版本,其中粗框线表示常用的两种混合参数化方案

在标准 KPP 模型中, 涡黏性系数参数化为:

$$K(z) = z_m W(\sigma) G(\sigma), \quad (1)$$

$$\sigma = -z / z_m, \quad (2)$$

$$K_c(z) = z_m W_c(\sigma) G(\sigma), \quad (3)$$

其中  $K$  和  $K_c$  分别表示动量和标量传输, 这里  $G$  是形状函数:

$$G(\sigma) = \sigma(1-\sigma)^2, \quad (4)$$

$z_m$  是混合层深度,  $W$  和  $W_c$  是湍流速度尺度传输的动

量和标量:

$$W(\sigma) = \frac{\kappa u_*}{\varphi_m(\sigma)}, \quad W_c(\sigma) = \frac{\kappa u_*}{\varphi_c(\sigma)}, \quad (5)$$

热稳定性函数  $\varphi_m(\sigma)$  和  $\varphi_c(\sigma)$  是由 Monin-Obukhov 相似给出的。

K-剖面参数化中的 Langmuir 混合作用涉及两个要点: 第一, Langmuir 环流作用在海表边界层内增强的垂直湍流动能(VKE), 第二, 对于更深层混合带来的影响。最近, 一些学者在 KPP 模型中加入 Langmuir 环流作用进行研究, 提出了不同的 LC 参数化方案<sup>[10, 21-23]</sup>, 下面将对这些参数化方案进行描述。

### 2.1.1 McWilliams 和 Sullivan<sup>[10]</sup>参数化方案

在 McWilliams 和 Sullivan<sup>[10]</sup>参数方案中, 基于实验数据发现, 当 LC 现象明显时, 近表面横向速度(即垂直于风和波方向的水平分量)与表层斯托克斯漂流成正比变化<sup>[24-25]</sup>。虽然存在两者比例系数数值不确定的问题, 但是为简单修改 KPP 模型添加 LC 效应提供了相关的思路。因此 McWilliam 等<sup>[10]</sup>通过增强的湍流速度标度, 通过增强因子来添加 Langmuir 环流的作用, 增强因子从湍流 Langmuir 数中参数化:

$$W(\sigma, La_t) = \frac{\kappa u_*}{\varphi_m(\sigma)} \cdot \varepsilon(La_t), \quad (6)$$

$$\varepsilon(La_t) = \left(1 + \frac{C_w}{La_t^{2\alpha_e}}\right)^{1/\alpha_e}, \quad (7)$$

其中  $La_t = \sqrt{u_*}/|U_s|$  表示 Langmuir 数,  $u_*$  表示摩擦速度,  $|U_s|$  代表由波浪模型计算的表面斯托克斯漂移速度的大小,  $C_w$  和  $\alpha_e$  为常数, 根据  $La_t=0.30$  时的 LES 结果,  $C_w=0.08$ , 修改后模型的关键特征是  $\varepsilon$  随着  $La_t$  的减小而增加, 以解释由于 Langmuir 循环引起的增强的垂直混合。对于没有 Langmuir 循环的剪切湍流, 该模型等同于原始 KPP 模型。

这些修改使得 KPP 湍流通量曲线与 LES 模拟的存在 LC 的情况相当匹配, 尤其是密度和边界标量表现出很好的一致性。对 KPP 方案的这种调整导致在 Langmuir 环流活跃的区域, 即湍流速度与小  $La_t$  的区域中的表面斯托克斯漂移成比例。McWilliams<sup>[10]</sup>表明, 这种改进使参数化的 KPP 通量曲线与 LES 相同情况下的模拟结果相当。

### 2.1.2 Smyth (2002) 参数化方案

Skyllingstad 等<sup>[26]</sup>使用大涡模拟(LES)描述了在风暴期间 24 小时内上层海洋混合的情况, 其利用观察到的剖面初始化并由观察到的表面通量驱动模式,

统计量化比较了 LES 模型中产生的湍流通量与定点测量出的湍流通量之间的关系。这些比较确定了 LES 对于用来描述上层海洋湍流的准确性及其限制, 比观测所能提供的要更加全面。因此, 为了改进 KPP 参数化方案, 将 KPP 结合到上层海洋的一维模型中, Smyth<sup>[21]</sup>通过与赤道太平洋西风暴期间上层海洋结构的观测和大涡模拟(LES)的比较来进一步推进了改进 KPP 模式的工作。Smyth 等人利用由 TOGA-COARE 提供的详细而全面的观察数据库<sup>[25]</sup>, 然后以与 LES 相同的方式使用观察对其进行初始化和强迫, 在 McWilliams(2000)参数方案中, 基于拟静态, 弱对流 Langmuir 环流的大涡模拟, 恒定  $C_w$  的值为 0.08。这个值的选取可能需要在强对流或强风的情况下进行修改, 因此, Smyth<sup>[21]</sup>将  $C_w$  乘以一个额外的因子增强 Langmuir 细胞在稳定(强制)条件下的作用, 并在对流条件下降低它: 通过用取决于热稳定性的函数替换常数  $C_w$ , 进一步推广了增强因子:

$$C_w = C_{w0} \left( \frac{u_*^3}{u_*^3 + 0.6w_*^3} \right)^l, \quad (8)$$

其中  $C_{w0}=0.15$ ,  $l=2$ ,  $w_*=(-\kappa B_f z_m)^{1/3}$  是对流速度刻度,  $B_f$  是表面浮力通量。 $B_f$  负值对应表面冷却, 这增强了热对流。这种改进增强了 Langmuir 环流在正浮力强迫下的影响, 并在对流条件下降低了负浮力强迫, 有助于解释风力驱动条件下的 Langmuir 环流效应, 同时在热对流占主导地位时减少效应产生, 使得修改后的 KPP 结果与 LES 之间达成更好的一致性。

### 2.1.3 Van Roekel(2012)参数化方案

在上述两种参数化方案中, 风诱导剪切和斯托克斯强迫的相对重要性由  $La_t$  表示。两项研究均假设斯托克斯漂移与表面风应力一致, 而真实海洋中的情况往往并非如此。假设风和波浪方向存在夹角, 摩擦力和斯托克斯漂移速度都必须投射到位于其间的 LC 轴方向, 以代表风致剪切和 Stokes 强迫的重要部分, 它通常会降低 Langmuir 环流的影响。Van Roekel 等<sup>[22]</sup>考虑了斯托克斯漂移方向与风向偏差对 LC 的影响, 结合斯托克斯漂移穿透深度的影响, 提出了新的 Langmuir 数:

$$La_{SL,proj} = \sqrt{\frac{u^* \cos(\alpha)}{\langle u_s \rangle_{SL} |\cos(\theta_{ww} - \alpha)|}}, \quad (9)$$

这里  $\alpha$  是风和 Langmuir 细胞之间的角度,  $\theta_{ww}$  是斯托克斯漂移和风之间的角度。下标 SL 表示表层的平均值, 表层被定义为混合层的上部 20%<sup>[9]</sup>。

Van Roekel 等<sup>[22]</sup>提出了一个新的增强因子的公式:

$$\varepsilon = |\cos \alpha| \sqrt{+(c_1 La_{SL,proj})^{-2} + (c_2 La_{SL,proj})^{-4}}, \quad (10)$$

其中常数  $c_1=1.5, c_2=5.4$ 。

### 2.1.4 Yang(2015)参数化方案

Yang 等<sup>[23]</sup>使用 LES 数据评估 KPP 改进模型涡流黏度的垂直剖面。比较了前文中 AB 两个 Langmuir 增强型 KPP 模型与 LES 的 K 剖面结果, 对  $La_t=0.36$  具有的强 Langmuir 循环情况, KPP 中的 Langmuir 增强因子  $\varepsilon$  有助于将涡黏性系数 K 的峰值增加到更接近从 LES 获得的峰值, 但是模拟 K 峰值仍然小于 LES 的结果。此外, KPP 模型的 K 剖面峰值深度低于 LES 的 K 剖面峰值深度。这些观察结果与 McWilliams 和 Sullivan<sup>[10]</sup>的结论一致, 在此基础上, Yang 等<sup>[23]</sup>提出当  $\alpha_e=4$  的情况下, KPP 模式的结果在不同的  $La_t$  情况下与 LES 结果取得更好的一致性。而且

引入了一个新的因子  $D(La_t)$ 来修正当  $La_t=\infty$  情况下的 KPP-Langmuir 增强型模式, 在新的 Langmuir 增强型 KPP 模型中, Langmuir 循环增强的涡流黏度湍流速度参数化为:

$$W(\sigma, La_t) = D(La_t) \varepsilon(La_t) \frac{ku_*}{\phi_m(\sigma)}, \quad (11)$$

$$\varepsilon(La_t) = \left(1 + \frac{C_w}{La_t^8}\right)^{1/4}, \quad (12)$$

$$D(La_t) = D_S + \frac{D_{LC} - D_S}{2} [1 - \tanh(\zeta(La_t - La_c))], \quad (13)$$

其中  $D_S=0.62, D_{LC}=1.45, La_c=0.5, \zeta=10$ 。使用新的 KPP 模式与 LES 结果进行比较显示与先前 KPP 模型相比, 在新的 KPP 模型中, 使用增强因子  $\varepsilon$  改善了小  $La_t$  情况下涡黏度 K 与 LES 结果的一致性; 将附加的因子  $D$  引入 KPP 模型改善了大的  $La_t$  情况下的一致性。

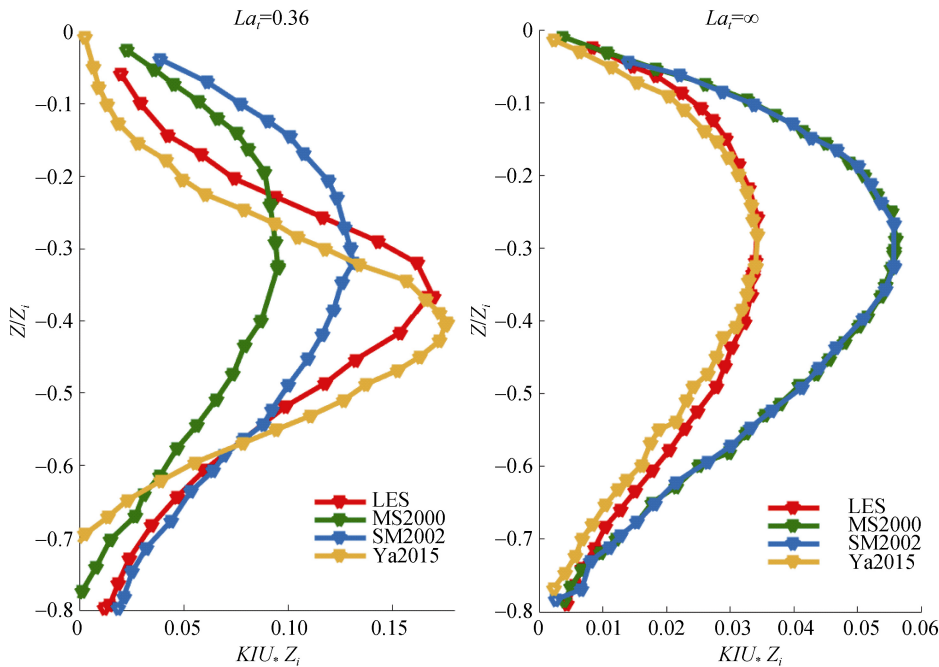


图 2 不同 Langmuir 数条件下的各参数化方案垂向涡黏系数 K 剖面(改自文献[23])

Fig. 2 Vertical profiles of eddy viscosity  $K(z)$  for various Langmuir numbers from different improved KPP model(modified from reference[23])

注: 红线: LES 模式的结果; 绿线: McWilliams and Sullivan (2000)参数化方案结果; 蓝线: Smyth (2002) 参数化方案结果; 黄线: Yang (2015)参数化方案结果

## 2.2 MY2.5 模式

MY2.5 模式全称 Mellor-Yamada2.5 阶模型, 是多数海洋模型中常用的混合参数化方案, 例如普林斯顿海洋模型(POM)、普通海洋湍流模型(GOTM)等。

Kantha 和 Clayson<sup>[27]</sup>将产生 Langmuir 环流的涡力

项  $U_s \times (\nabla \times U)$  添加到 MY2.5 阶湍流封闭模式中参数化 Langmuir 环流对 OML 湍流的影响, 动量方程改为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - f(V + V_s) = \frac{\partial}{\partial Z} \left[ K_m \frac{\partial U}{\partial Z} \right], \quad (14)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} - f(U + U_s) = \frac{\partial}{\partial Z} \left[ K_m \frac{\partial V}{\partial Z} \right], \quad (15)$$

同时将湍动能方程和混合长方程改为:

$$\begin{aligned} \frac{D}{D_t}(q^2) - \frac{\partial}{\partial z} \left[ qlS_q \frac{\partial}{\partial z}(q^2) \right] &= -2\overline{uw} \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial u_s}{\partial z} \right) - \\ &2\overline{vw} \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) + 2\beta g \overline{w\theta} - 2 \frac{q^3}{B_l l}, \quad (16) \\ \frac{D}{D_t}(q^2 l) - \frac{\partial}{\partial z} \left[ qlS_l \frac{\partial}{\partial z}(q^2 l) \right] &= E_1 l \left( -\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \\ E_6 l \left( -\overline{uw} \frac{\partial u_s}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) &+ E_3 (\beta g \overline{w\theta}) - \\ E_2 \frac{q^3}{B_l} \left[ 1 + E_4 \left( \frac{l}{\kappa l_w} \right)^2 \right] &+ E_5 (2\Omega) q^2 l \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $u_s$  和  $v_s$  斯托克斯漂移速度  $V_s$  的分量, 表层的 stokes 漂流的值由  $V_{s0}=11.8u_s$  给出, 将修改后的模型结果与 McWilliams<sup>[6]</sup> 中 LES 的结果进行对比, 结果显示加入 Langmuir 项后在整个混合层中 TKE 和耗散率升高, 混合增强从而加深了混合层, 海表面温度下降。

### 2.3 Noh (2016) 参数化方案

OMLM 是通过 Noh 模型的修改而开发的, 该模型已被证明可以很好地再现真实的上层海洋结构<sup>[28-29]</sup>。该模型是使用涡流扩散系数和黏度的湍流闭合模型, 类似于 Mellor-Yamada 模型, 但是再现了一个均匀的混合层, 已应用于各种海洋模型中进行研究, 并且模型中使用的参数化已经通过 LES 结果证实。对于模型的详细描述, 可以参考 Noh 和 Kim<sup>[28]</sup>。在该模型中, 涡流黏度计算方法为:

$$K_m = S_m q l, \quad (18)$$

$$K_h = S_h q l, \quad (19)$$

其中  $S_m$  和  $S_h$  为经验常数, 和 MY2.5 模型一样, 在没有分层的情况下, 模式中的混合长为

$$\frac{1}{l_0} = \frac{1}{\kappa(z+z_0)} + \frac{1}{h}. \quad (20)$$

Noh 等<sup>[30]</sup>最近通过对 LES 结果的分析发现, 只有当 MLD 较浅且分层较弱时, LC 才能增强垂直混合, 使得  $K_m$  和  $K_h$  增加。根据公式,  $K_h^L / K_h^O$  可以通过  $l^L / l^O$  来估算(其中上标 L 和 O 分别代表有 LC 和无 LC 效应的情况), 因此在 LC 存在下的混合长度标度可以通过修改公式(21)来参数化:

$$\frac{1}{l_0} = \frac{1}{\kappa \Gamma (z+z_0)} + \frac{1}{h}. \quad (21)$$

$\Gamma$  在不存在 LC ( $La_r = \infty$ ) 的情况下等于 1, 并且随着

$La_r$  的减少而增加; 例如, 在  $La_r = 0.32$  处,  $\Gamma$  可以增大到 10。Noh 将新的 OMLM 应用于 OGCM 模式, 通过简单修改混合长方程再现了与 LES 结果良好一致的增强垂直混合效果, 纠正了高纬度海洋中夏季混合层过浅的现象, 而不会影响热带海洋中的温跃层。

### 3 改进的参数化应用及问题讨论

Fan 和 Griffies<sup>[31]</sup>将 McWilliams 和 Sullivan 以及 Smyth 等人提出的两种改进的 KPP 模型应用于全球气候模拟。结果表明, 在 MOM 全球海洋环流模型中使用这种增强的湍流速度尺度参数化方案对某些地区的温度和混合层深度的演变具有显著影响, Smyth2002 参数化方案能有效改善 MLD 和海面温度 (SST)。然而, 当在 NCAR 地球系统模型 CESM1.2 中实施时, 两种方案都产生了过度混合的现象。Li 等<sup>[32]</sup>将前两种参数化方案以及新的 Langmuir 数应用到 CESM1.2 气候模型中, 发现在模拟结果中前两种方案都会出现过度混合的现象, 但新的 Langmuir 数使得南大洋 MLD 的浅层偏差在夏季减少了 27%, 在冬季减少了 9%, 通过 Langmuir 混合参数化方案改进了气候模式。D'Alessio 等<sup>[33]</sup>在类似 MY2.5 的 2 阶湍流封闭模型中加入 Langmuir 环流因素, 通过修改对流速度尺度以及将 CL 涡度力加入到 TKE 方程和动量方程, 模拟结果表明混合层加深。Li 等<sup>[34]</sup>修改 MY2.5 模型, 参数化斯托克斯力探究其对上层海洋混合的影响, 结果表明斯托克斯漂流提高了上层海洋混合的耗散率和湍流能量。Uchiyama 等<sup>[35]</sup>在区域海洋模型 ROMS 中加入斯托克斯涡度力, 在海洋环流数值模拟中加入波流相互作用。张学峰等<sup>[36]</sup>基于三维 MITgcm 海洋模式, 使用包含 Langmuir 混合作用的 KPP 方案, 改进了黄海夏季上混合层的模拟效果。Li 等<sup>[37]</sup>利用区域海洋浪流耦合模式 (ROMS-SWAN), 在考虑 Langmuir 环流和波浪破碎机制下, 模拟了 2008 年 9 月南海混合层深度, 研究揭示 Langmuir 环流使南海混合层深度加深。Allard 等<sup>[38]</sup>介绍了由近岸波浪模型 (SWAN) 和海军海岸海洋模型 (NCOM) 组成的耦合海洋-大气中尺度预报系统 (COAMPS), 对海洋模型进行了修正, 考虑了斯托克斯漂流的影响, 结果表明 Langmuir 环流增强了垂向混合。Wang 等<sup>[39]</sup>利用普林斯顿海洋模型 (POM) 对全球海洋环流进行了模拟, 结果表明斯托克斯漂流的大小与欧拉平均流相当, 将斯托克斯漂流因素加入海洋模型既影响欧拉流又影响拉格朗日漂流, 使垂直混合系数增大。

上述研究在大尺度海洋环流模型中考虑了 Langmuir 环流效应,在一定程度上改善了对于海洋上混合层非破碎波致应力的影响模拟结果,但是依然存在有许多不足,在现有的 KPP 垂直混合参数化方案中,对于湍流特征速度增强因子的选取和应用条件需要考虑风诱导剪切和斯托克斯强迫的相对重要性,以及表层斯托克斯漂流与风向偏差产生的影响,而添加斯托克斯剪切效应项的方法对于斯托克斯漂流计算方法准确度的依赖度较高,在复杂的波浪场条件下,斯托克斯漂流剖面的估算的误差将对结果造成很大影响<sup>[40]</sup>。

## 4 小结与展望

Langmuir 环流将海洋上混合层的热量,物质和动量带入海洋深层,增强了海洋混合并影响着海气界面的物质能量交换,对混合层内湍动能和垂向混合产生重要影响。尽管通过 LES 方法中可以直接模拟 Langmuir 效应,由于 LES 模型的性质使得难以将它们结合到复杂的海洋环流和海浪耦合模型中,因此必须在雷诺平均模型中对 Langmuir 环流进行参数化,方法大致可以分为三类,一种是在 KPP 垂向混合参数化方案中引入湍流特征速度增强因子,一种是在 Mellor-Yamada2.5 湍流闭合模型中增加斯托克斯漂流剪切效应项,对 Stokes 漂流计算采用单频简谐波假设,还有一种是修改混合长方程来添加 LC 效应,但是由于这些方案都对于 Stokes 漂流的垂向结构及其方向与风向的偏差造成的影响估计不足,导致现有的 LC 海洋混合参数化方案会在模拟上混合层混合过程中产生明显的误差,尤其是在风况复杂的条件下,因此,需要进一步改进 Stokes 漂流的计算方案,更加优化 Langmuir 环流参数化方案,使得其在复杂海况下的适用性更强。

### 参考文献:

- [1] Sullivan P P, McWilliams J C. Dynamics of winds and currents coupled to surface waves[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42(1): 19-42.
- [2] Craik A D D. The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 1977, 81(2): 15.
- [3] Craik A D D, Leibovich S. A rational model for Langmuir circulations[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 1976, 73(3): 26.
- [4] Leibovich S. On the evolution of the system of wind drift currents and Langmuir circulations in the ocean. Part 1. Theory and averaged current[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 1977, 79(4): 29.
- [5] Leibovich S. Convective instability of stably stratified water in the ocean[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 1977, 82(3): 21.
- [6] McWilliams C, Sullivan P, Moeng C. Langmuir turbulence in the ocean[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 334(334): 1-30.
- [7] Skillingstad E D, Denbo D W. An ocean large-eddy simulation of Langmuir circulations and convection in the surface mixed layer[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1995, 100(C5): 8501-8522.
- [8] Thorpe S A. Langmuir circulation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2004, 36(36): 55-79.
- [9] Harcourt R R, D'Asaro, Eric A. Large-Eddy simulation of Langmuir turbulence in pure wind seas[J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 38(7): 1542-1562.
- [10] McWilliams J C, Sullivan P P. Vertical mixing by Langmuir circulations[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2000, 6(3): 225-237.
- [11] Li M, Garrett C, Skillingstad E. A regime diagram for classifying turbulent large eddies in the upper ocean[J]. Deep-Sea Research, Part I (Oceanographic Research Papers), 2005, 52(2): 0-278.
- [12] Noh Y, Min H S, Raasch S. Large eddy simulation of the ocean mixed layer: The effects of wave breaking and Langmuir circulation[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34, 720-735.
- [13] Noh Y, Kang I S, Herold M, et al. Large eddy simulation of particle settling in the ocean mixed layer[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(8): 085109.
- [14] Grant A L M, Belcher S E. Characteristics of Langmuir Turbulence in the ocean mixed layer[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(8): 1871-1887.
- [15] Kukulka T, Plueddemann A J, Trowbridge J H, et al. Significance of Langmuir circulation in upper ocean mixing: comparison of observations and simulations[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(10): 92-103.
- [16] 李爽. Langmuir 环流和波浪破碎对上层海洋混合影响的数值研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.  
Li Shuang. Numerical study of the effects of Langmuir circulation and wave breaking on upper ocean mixing[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [17] Skillingstad E D. Scales of Langmuir circulation generated using a large-eddy simulation model[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2000, 6(3): 239-246.
- [18] Burchard H, Craig P D, Gemmrich J R, et al. Observational and numerical modeling methods for quantifying coastal ocean turbulence and mixing[J]. Progress in

- Oceanography, 2008, 76(4): 399-442
- [19] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, 20(4): 851-0.
- [20] Large W G, McWilliams J C, Doney S C. Oceanic vertical mixing-a review and a model with a nonlocal boundary-layer parameterization[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(4): 363-403.
- [21] Smyth W D, Skyllingstad E D, Crawford G B, et al. Nonlocal fluxes and Stokes drift effects in the K-profile parameterization[J]. *Ocean Dynamics*, 2002, 52(3): 104-115.
- [22] Van Roekel L P, Fox-Kemper B, Sullivan P P, et al. The form and orientation of Langmuir cells for misaligned winds and waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C5): C05001.
- [23] Yang D, Chen B, Chamecki M, et al. Oil plumes and dispersion in Langmuir, upper-ocean turbulence: Large-eddy simulations and K-profile parameterization[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(7): 4729-4759.
- [24] Smith J A. Evolution of Langmuir circulation during a storm[J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 1998, 103(C6).
- [25] Smith J. A. Observations of wind, waves, and the mixed layer: The Scaling of Surface Motion[M]. Banner M L. *Wind-Driven Air-Sea Interface: Electromagnetic and Acoustic Sensing, Wave Dynamics, and Turbulent Fluxes*. Sydney: University of New South Wales, 1999: 231-238.
- [26] Skyllingstad E D, Smyth W D, Moum J N, et al. Upper-Ocean Turbulence during a Westerly Wind Burst: A Comparison of Large-Eddy Simulation Results and Microstructure Measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(1): 5-28.
- [27] Kantha L H, Clayson C A. An improved mixed layer model for geophysical applications[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1994, 99(C12): 25235-25266.
- [28] Noh Y, Kim H J. Simulations of temperature and turbulence structure of the oceanic boundary layer with the improved near-surface process[J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 1999, 104(C7).
- [29] Noh Y, Jang C J, Yamagata T. Simulation of more realistic upper-ocean processes from an OGCM with a new ocean mixed layer model[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(5): 1284-1307.
- [30] Noh Y, Goh G, Raasch S. Influence of Langmuir Circulation on the Deepening of the Wind-Mixed Layer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(3): 472-484.
- [31] Fan Y, Griffies S M. Impacts of parameterized Langmuir turbulence and nonbreaking wave mixing in global climate simulations[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(12): 4752-4775.
- [32] Li Q, Webb A, Foxkemper B, et al. Langmuir mixing effects on global climate: WAVEWATCH III in CESM[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 103: 145-160.
- [33] D'Alessio S J D, Abdella K, McFarlane N A. A new second-order turbulence closure scheme for modeling the oceanic mixed layer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(8): 1624-1641
- [34] Li S, Song J, Sun Q. Effect of Stokes drift on upper ocean mixing[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(2): 11-20.
- [35] Uchiyama Y, McWilliams J C, Shchepetkin A F. Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex-force formalism: Application to the surf zone[J]. *Ocean Modelling*, 2010, 34(1): 16-35.
- [36] 张学峰. 波浪破碎和 Langmuir 环流对黄海夏季上层混合影响的数值研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011. Zhang Xuefeng. Numerical investigation of the effects of surface wave breaking and Langmuir circulation on the upper mixing during summer in the Yellow Sea[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [37] Li S, Song J, Fan W. Effect of Langmuir circulation on upper ocean mixing in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(3): 28-33.
- [38] Allard R, Rogers E, Martin P, et al. The US Navy coupled ocean-wave prediction system[J]. *Oceanography*, 2014, 27(3): 92-103.
- [39] Wang Z, Wu K, Dong S, et al. Effect of wave-induced Stokes drift on the dynamics of ocean mixed layer[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(1): 233-242.
- [40] Webb A, Fox-Kemper B. Impacts of wave spreading and multidirectional waves on estimating Stokes drift[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 96: 49-64.



# Progress in parameterization of Langmuir circulation in Reynolds Average Navier-Stokes(RANS) model

QIU Ying, YANG De-hua, LI Shuang

(Institute of Physical Oceanography, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316000)

Received: Jan. 14, 2019

Key words: Langmuir circulation; parameterization; KPP; large eddy simulation

**Abstract:** It has been widely recognized that Langmuir circulation is one of the key factor in the formation and deepening of the mixed layer on the upper ocean. It is of great significance for the ocean mixed layer. In recent years, many researchers have used the large eddy simulation (LES) to study the Langmuir circulation mechanisms in order to find the proper parameterization of LC effect in the Reynolds average model. The Langmuir turbulence was considered into the ocean circulation or ocean coupling model, and a series of parameterization schemes were proposed. In this paper, the research advances in the research progress of Langmuir circulation parameterization in Reynolds average model, which can be divided into the several schemes: one method is parameterized by an enhancement factor applied to the turbulent velocity scale, one is to add the Stokes drift shear effect term in the Mellor-Yamada 2.5 turbulence closed model. In addition, the Langmuir effect is added by modifying the mixing length scale in the model. The existing parameterization schemes have improved the simulation of mixed layer depth and SST to some extent, affirmed the role of LC in deepening mixing, but there are still some deficiency that need to be further improved in future research.

(本文编辑: 丛培秀)