

# 三种垂向混合方案对 HYCOM 模拟能力的影响<sup>\*</sup>

李 理, 王 琰, 王 玉

(中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

**摘 要:** 基于 HYCOM 设计了 3 组数值试验, 分别采用 KPP(K-Profile Parameterization), KT(Kraus and Turner), MY(Mellor and Yamada)2.5 三种垂向混合方案, 比较分析了这 3 种混合方案对全球大洋的模拟能力。结果表明: KPP 方案和 MY2.5 方案模拟的温度场十分类似, 在中高纬度几乎一致, 在赤道断面上 MY2.5 方案的最大误差小于 KPP 方案, 对于暖池区 SST 的模拟 MY2.5 方案的误差也稍小于 KPP 方案, 但二者的差别并不明显。在模拟赤道潜流时, MY2.5 方案暴露出明显不足, 其模拟效果要明显差于 KPP 方案和 KT 方案。KT 方案模拟效果的好坏依赖于混合层底的确定是否准确, 其中高纬度海域的模拟效果要明显优于热带海域。总之, 在热带海域, KPP 方案的模拟整体效果最好, 在中高纬度海域, KPP 方案和 MY2.5 方案差别不大, 而 KT 方案则更适用于中高纬度。

**关键词:** 垂向混合方案; KPP; KT; MY2.5; HYCOM

**中图分类号:** P731

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2016)02-0186-11

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6647.2016.02.004

海洋的垂向混合过程对于海表温度的调节有着重要作用, 垂向混合过程控制着海-气间的动量和能量交换。由于垂向混合过程中包含着小尺度的湍流过程, 但在海洋环流模式(OGCMs)中, 这些过程很难控制, 因此需要对这些过程进行合理的参数化<sup>[1]</sup>。前人提出了许多海洋的垂直混合参数化方案, 并有学者对这些方案进行了对比研究: 舒启等<sup>[2]</sup>基于 MOM4, 分别采用 PP 和 KPP 两种方案, 对比了它们的全球模拟能力, 结果表明, KPP 方案在中高纬模拟效果优于 PP 方案, 在低纬度海域二者表现各有不同; Chen 等<sup>[3]</sup>在提出一种新的块体混合方案的基础上, 还对比了这一方案同 KT 方案及 MY2.5 方案的模拟能力, 其研究表明, MY2.5 方案越靠近低纬度模拟的效果越好, 而 KT 方案则正好与之相反; David Halpern 等<sup>[4]</sup>采用 MY 和 PP 两种垂直混合方案分别对热带太平洋做了模拟, 其结果显示 PP 方案的模拟结果较 MY 方案要更接近于观测; Halliwell 等<sup>[5]</sup>通过将 7 种不同的混合方案植入 HYCOM 模式中, 然后对其气候态模拟能力进行了对比, 结果发现, KPP 方案, GISS 方案和 MY2.5 方案的模拟能力相对较好。由于不同的垂向混合方案在不同海域的模拟能力不同, 因此本文基于 HYCOM 模式, 对比了 3 种混合方案在热带海域和中高纬度海域的模拟能力, 并简单分析了造成差异的原因, 以期为后续的科研工作提供参考。

## 1 模式简介及设置

混合坐标大洋环流模式 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) 是基于美国迈阿密(MIAMI)大学等密度面坐标海洋模式(MICOM)发展演变而来的<sup>[6]</sup>。HYCOM 采用垂向混合坐标(等密度坐标、sigma 坐标和 z 坐标的混合)<sup>[6]</sup>, 结合 3 种垂向坐标系的优缺点后, 在开阔的深水大洋中采用等密度面坐标, 在上层混

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-05-07

资助项目: 国家重点基础研究发展计划——El Nino 可预报性模式及同化技术改进(2012CB417404); 教育部科学技术研究项目——全球变暖对太平洋年代际涛动的调节过程及机理(113041A)

作者简介: 李 理(1992-), 女, 湖南沅陵人, 硕士研究生, 主要从事海洋环流方面研究. E-mail: lllf0506@126.com

(陈 靖 编辑)

合层采用  $z$  坐标地坐标,而在近岸浅水区采用 sigma 坐标。因此,在模式运行的每一步中都进行斜压调整,对这 3 种坐标进行平滑和融合,以获得各项要素的最佳分布。

为了对比不同的垂向混合方案模拟效果,本文设计三组数值试验,分别采用了 KT、KPP 和 MY2.5 这 3 种垂向混合方案,其余设置均相同:模拟海域为  $78^{\circ}\text{S}\sim 66^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ,地形数据为分辨率为  $5'$  的全球地形(ETOPO5),水平方向采用 Mercator 坐标系,水平分辨率为  $0.50^{\circ}\times 0.50^{\circ}\cos\theta$ ( $\theta$  是纬度)。模式垂向分为 22 层,大气强迫场来自 1948—2003 年气候态的 NCEP 月平均数据,参量包括:距海面 10 m 处风速、海表 2 m 处气温、比湿、短波与长波净辐射、降水等,海表面盐度松弛到气候态月平均的 Levitus1994 资料的盐度场。模型由静止开始,持续运行了 30 a 并在第 24 年之后逐渐达到稳定,取最后五年的月平均结果用于评估和分析。

## 2 混合方案

目前的垂直混合方案可以大致分为 2 类。第一类为块体混合方案,这一类混合方案主要有 KT(Kraus and Turner)<sup>[7]</sup>,PWP (Price, Weller and Prinkel)<sup>[8]</sup>和 Chen 等<sup>[3]</sup>提出的一种基于 KT 方案和 PWP 方案的新型块体混合方案等;第二类为连续混合方案,其与块体混合方案的最大区别是能够描述混合层的垂直结构,这类方案主要有 PP(Pacanowski and Philander)<sup>[9]</sup>,MY(Mellor and Yamada)<sup>[10]</sup>,KPP(K-Profile Parameterization)<sup>[11]</sup>和 Canuto<sup>[12]</sup>等。

本文基于 HYCOM 模式,对 KT、KPP 和 MY2.5 三种混合方案的模拟效果进行了对比研究。KT 方案是一种块体混合方案的,假设混合层是充分混合,忽略由剪切不稳定造成的混合<sup>[7]</sup>。在 HYCOM 中,KT 方案模拟效果的好坏取决于混合层深度的确定是否准确,过深或过浅都会对其下的模拟效果造成很大影响<sup>[5-6]</sup>;KPP 是一种连续混合方案,考虑了较多的物理过程。其最大的优势就是可以解决上混合层和海洋内部层化较弱的跨等密面混合问题,能平滑地转换混合较好的表层边界与混合较弱的海洋内水层之间的计算<sup>[11]</sup>。MY 方案是在各阶近似上将湍方程进行封闭,由此得到高阶湍封闭模式,用以确定原始方程中的垂向湍扩散系数。MY2.5 阶近似就是在假设湍流的剪切生成和浮力生成正好与湍流耗散过程相平衡基础上,还考虑了平流项和扩散项,且忽略温、盐变量方程中的实时导数项和扩散项,并以湍动能  $q$  和湍动特征长度  $l$  来对方程进行参数化,最终得到湍动能方程和混合长方程。此种方案只有对湍动能的预报方程,其他物理量通过湍动能获得<sup>[10]</sup>。在 HYCOM 的所有混合方案中,只有 MY2.5 方案考虑了湍流的水平对流和扩散效应,但其耗费的机时也是其他混合方案的 1.5 倍左右<sup>[13]</sup>。

## 3 模式结果分析

### 3.1 全球温度分布差异

为了具体比较 3 种混合方案在全球范围内的模拟效果,依次选取了 0,100 和 500 m 三个深度,并分别求出 3 种模拟结果同 WOA09 温度数据的误差及二者相关系数随纬度分布(图 1~3),其计算方法是求出每个网格点上的相关系数后再做纬向平均。

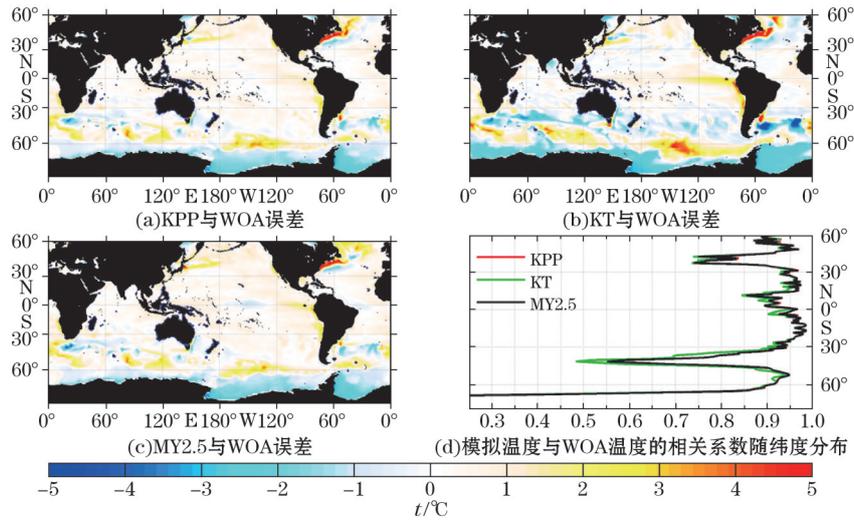


图 1 海表面温度差异(°C)

Fig. 1 Sea surface temperature differences(°C)

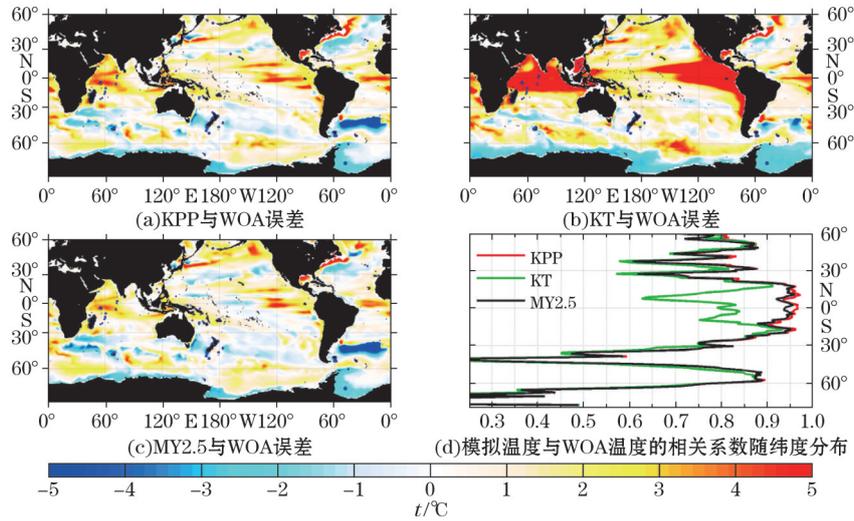


图 2 100 m 水深温度差异(°C)

Fig. 2 Temperature differences at 100m depth(°C)

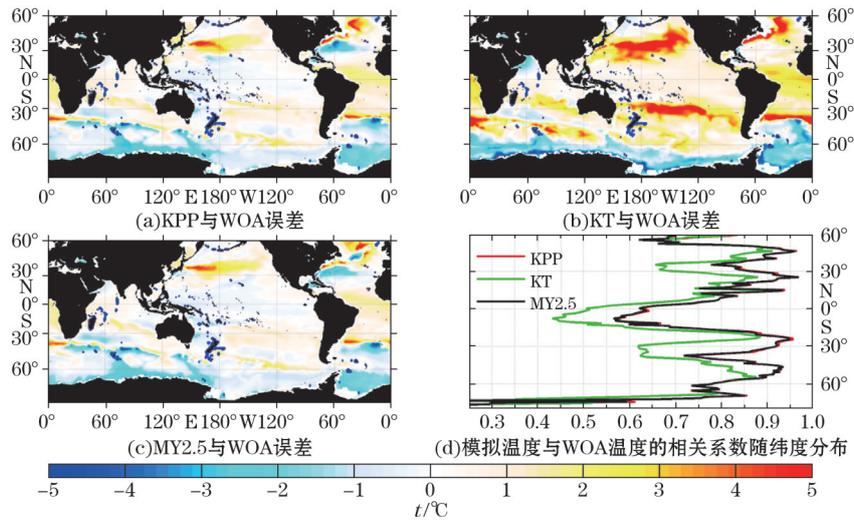


图 3 500 m 水深温度差异(°C)

Fig. 3 Temperature differences at 500m depth(°C)

从图 1d 可以看出,3 种混合方案的模拟 SST 差别不大,图 1a~图 1c 表明,三者模拟效果均是低纬度要优于高纬度,误差大于  $1^{\circ}\text{C}$  的海域大部分出现在中高纬区域( $30^{\circ}\text{N}$  以北和  $30^{\circ}\text{S}$  以南)以及热带太平洋的东部。在大部分海域,3 种混合方案模拟的 SST 均偏高,这主要是由于这些混合方案模拟的垂向混合程度均不足<sup>[14]</sup>。除了在大西洋中高纬海域外 KPP 方案要稍好于 MY2.5 方案外,其余海域二者的模拟结果均相近。三者在黑潮及其延伸体以及湾流流经的海域都出现模拟温度偏高的现象,且误差都大于  $1^{\circ}\text{C}$ 。此外,3 种混合方案对于  $30^{\circ}\text{S}$  以南大洋的 SST 模拟效果均不好,尤其是 KT 方案,这是由于 KT 方案不考虑由剪切不稳定造成的混合造成的<sup>[7]</sup>。MY2.5 方案在模拟风应力的搅拌作用方面存在缺陷<sup>[3]</sup>,对于较浅的混合层,由剪切造成的混合相对于风应力的搅拌要更突出<sup>[3]</sup>,因此在热带太平洋东部,KT 方案模拟的 SST 要比 MY2.5 方案更高。相反,对较深的混合层,风应力的搅拌作用就更为重要,因此在黑潮及其延伸体以及湾流区域,KT 方案模拟的 SST 就要比 MY2.5 方案稍低。

图 2 给出了 100 m 深度处 3 种混合方案模拟结果同 WOA 温度的差异与相关性。从图 2d 可以看出,KT 方案在低纬度的模拟效果较差,KPP 最好,在中高纬度,三者差别不是太大。KT 方案在大部分海域的模拟结果都较差,温度误差都在  $1^{\circ}\text{C}$  以上,尤其是在印度洋北部和热带太平洋中东部。KPP 方案与 MY2.5 方案的模拟效果整体类似,只是在大西洋东北部和热带太平洋西部有些微差别。3 种混合方案对于温跃层内温度模拟效果均较差,尤其是 KT 方案,这是由于块体方案是以风应力的搅拌为主要的湍动能来源,而不能估计出混合层下的湍流混合<sup>[9]</sup>,在此基础上,其在混合层底以下采用了 KPP 方案<sup>[5]</sup>,可能会造成从此往下的垂向混合系数模拟得偏高,因此造成模拟的温跃层温度相对更高。

至 500 m 水深(图 3),从相关系数分布来看(图 3d),KT 方案的模拟效果较差,而 KPP 方案和 MY2.5 方案的结果类似,且大部分区域的温度误差均小于  $1^{\circ}\text{C}$ 。造成 KT 方案误差的主要原因就是混合层底的模拟不够准确。

### 3.2 热带海域模拟

#### 3.2.1 太平洋赤道潜流模拟

赤道潜流是热带太平洋流系的一个重要组成部分,其流轴大致与温跃层一致,流长几乎横跨整个太平洋<sup>[15]</sup>。图 4 依次给出了赤道上自西向东 3 个剖面上的纬向流速(向东为正),其中黑线是多年平均的热带海洋大气计划(Tropical-Ocean-Atmosphere Project, TOA)和三角转换浮标网络(Triangle Trans-Ocean Buoy Network)中的 ADCP 观测资料,蓝线、红线、绿线依次是 KPP、KT、MY2.5 的模拟结果。

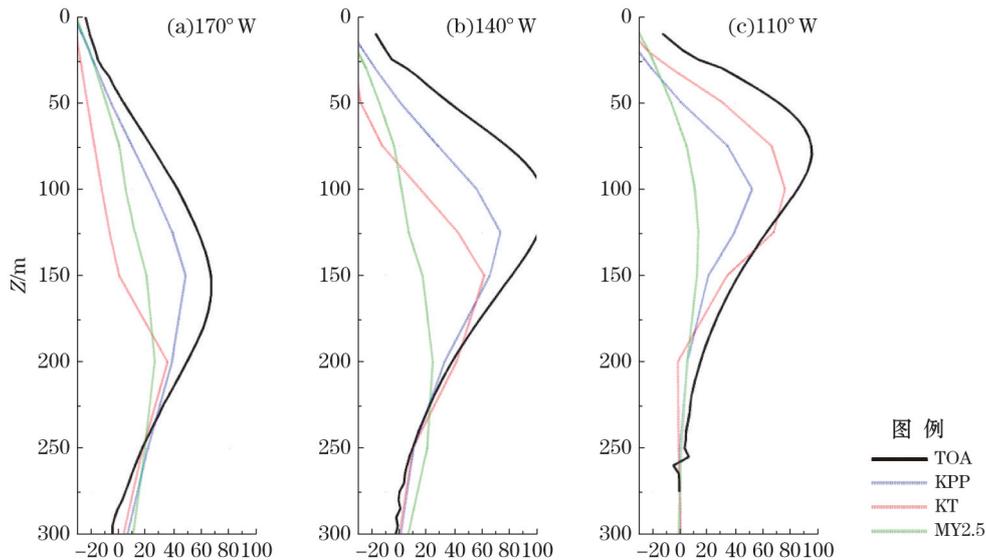


图 4 太平洋赤道潜流纬向分量( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )剖面图

Fig. 4 Vertical profiles of long-term mean zonal component of the Pacific Equatorial Under current at equator at different locations( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

在  $170^{\circ}\text{W}$  剖面, KPP 方案模拟的流轴与实测数据深度大体接近, 但在 150 m 上下, 最大流速相差约 20 cm/s, KT 方案模拟的流轴偏深约 50 m, 最大流速误差在 30 cm/s 左右;  $140^{\circ}\text{W}$  剖面, 流轴抬升, 在 130 m 深度左右中心流速达到最大, 而 KPP 方案模拟出的流轴偏深 20 m 左右, 最大流速相差超过 30 cm/s, KT 方案模拟的流轴偏深约 70 m, 模拟的最大流速偏小 40 cm/s 以上;  $110^{\circ}\text{W}$  剖面, 流轴继续抬升至 80 m, 最大流速相对变小, 在 95 cm/s 左右, 而 KPP 方案同 KT 方案模拟的流轴均偏深 25 m 左右, 但 KT 方案模拟的最大流速误差更小, 小于 20 cm/s。大体来看, 3 种混合方案均大致模拟出了赤道潜流自西向东流轴逐渐抬升的趋势, 但普遍存在模拟的流轴偏深, 流速偏小的情况。其中 MY2.5 方案模拟纬向流速的垂向结构与实测数据偏差较大, 考虑是其对于模式垂向分辨率比较敏感<sup>[5]</sup>造成。在赤道区域, 垂直混合系数越大, 赤道潜流范围越向下扩张, 而当混合系数取值减小时, 其趋势正好相反<sup>[16]</sup>。对于参数化方案 KPP, 可能是由于其模拟的垂直湍黏系数偏大, 从而流轴下沉。自西向东, 混合层深度逐渐变浅, 剪切不稳定相较于风应力的搅拌作用要更为重要, 所以 KT 方案模拟出的混合层深度会逐渐偏浅, 再加上其在混合层下会采用 KPP 方案继续进行模拟<sup>[5]</sup>, 这就相当于减小了 KPP 方案中的垂向混合系数, 因此, 自西向东 KT 方案的模拟效果会越来越好, 甚至出现优于 KPP 方案的结果。

### 3.2.2 温度模拟

图 5 给出了太平洋赤道断面( $0^{\circ}$ )纬向平均后的温度误差随时间的变化。可以看到 KPP 方案同 MY2.5 方案的模拟结果类似, 而 KT 方案的模拟结果除在 50 m 以浅的海域与其余 2 种混合方案差别较小外, 在 50 m 以深海域的模拟效果均较差, 在温跃层深度附近尤为明显, 且全年都保持着较高的正误差, 最大误差约为 150 m。

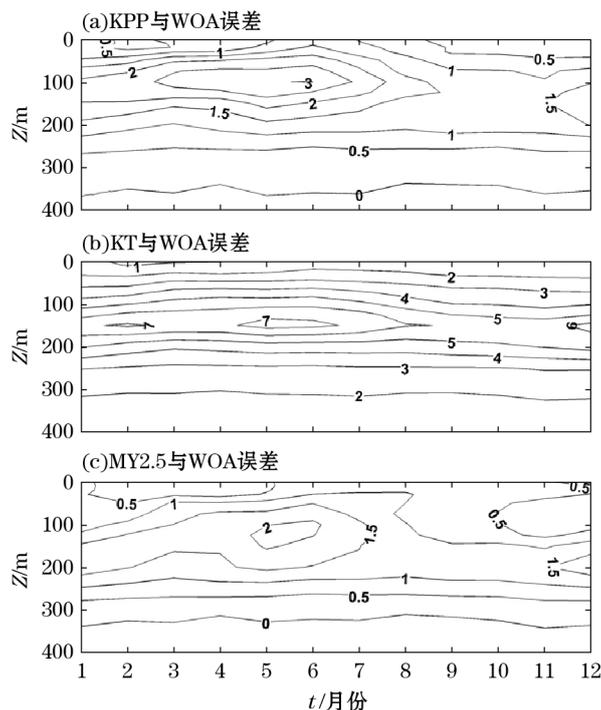


图 5 赤道( $0^{\circ}$ )断面太平洋纬向平均温度误差( $^{\circ}\text{C}$ )年循环

Fig. 5 Zonal averaged temperature differences( $^{\circ}\text{C}$ ) at the equator of the Pacific as a function of depth and time

3 种混合方案的最大误差均出现在上半年, 其中 KT 方案的误差最大。MY2.5 方案的结果在 200 m 以下与 KPP 类似, 200 m 以浅二者还是存在一定差别: MY2.5 方案最大误差要小于 KPP 方案, 且持续时间要短于 KPP 方案, 但二者最大误差出现的深度均在 100~150 m 深度范围内。冬季至春季, 混合层较秋季深,

风应力的搅拌对于混合的作用更明显,使得热量自上而下的传递更为深入,海水的混合更为彻底,模拟出的混合层较实际变深从而导致温跃层内的温度偏高,因此这一时段出现了 KT 方案全年相对的最大误差,而 MY2.5 方案由于对风应力搅拌作用模拟方面的缺陷,模拟的混合不如 KT 方案深入,因此温跃层内正误差也较 KT 方案小。而 KPP 方案结果的出现,可能是模拟过程中计算的垂向混合系数和黏性系数不够准确,受风应力的影响较大造成。

### 3.2.3 西太平洋暖池模拟

前人的研究表明,海洋模式对西太暖池的模拟结果受到海气通量数据和计算方法的影响,此外,也应与海洋模式自身的参数设置与动力结构有关<sup>[17-19]</sup>。为了进一步探究 3 种不同的垂向混合方案对热带海洋模拟结果的区别,对三者的西太暖池和西太冷舌区域的模拟结果也进行了对比。图 6 分别给出了 1 月份和 7 月份时不同混合方案模拟出的暖池区域温度与 WOA 的误差以及其模拟的暖池范围,在此处,选取 28.5 °C 作为暖池的判定指标<sup>[20-21]</sup>。图中绿线为模式结果,黑线为 WOA 数据结果。

从暖池范围上看,3 种混合方案均较好模拟出了暖池范围从冬季开始逐渐北移,且面积不断扩大,至秋季达到面积最大而后急剧衰减(4、9 月分布图未给出)的变化趋势。但由于这 3 种混合方案均未考虑波致混合,造成其模拟的混合较实际偏弱,即混合层底偏浅<sup>[22]</sup>,因此 3 种混合方案模拟的 SST 在热带海域大部分区域都是偏高的,其模拟出的暖池的面积也就较 WOA 数据偏大。

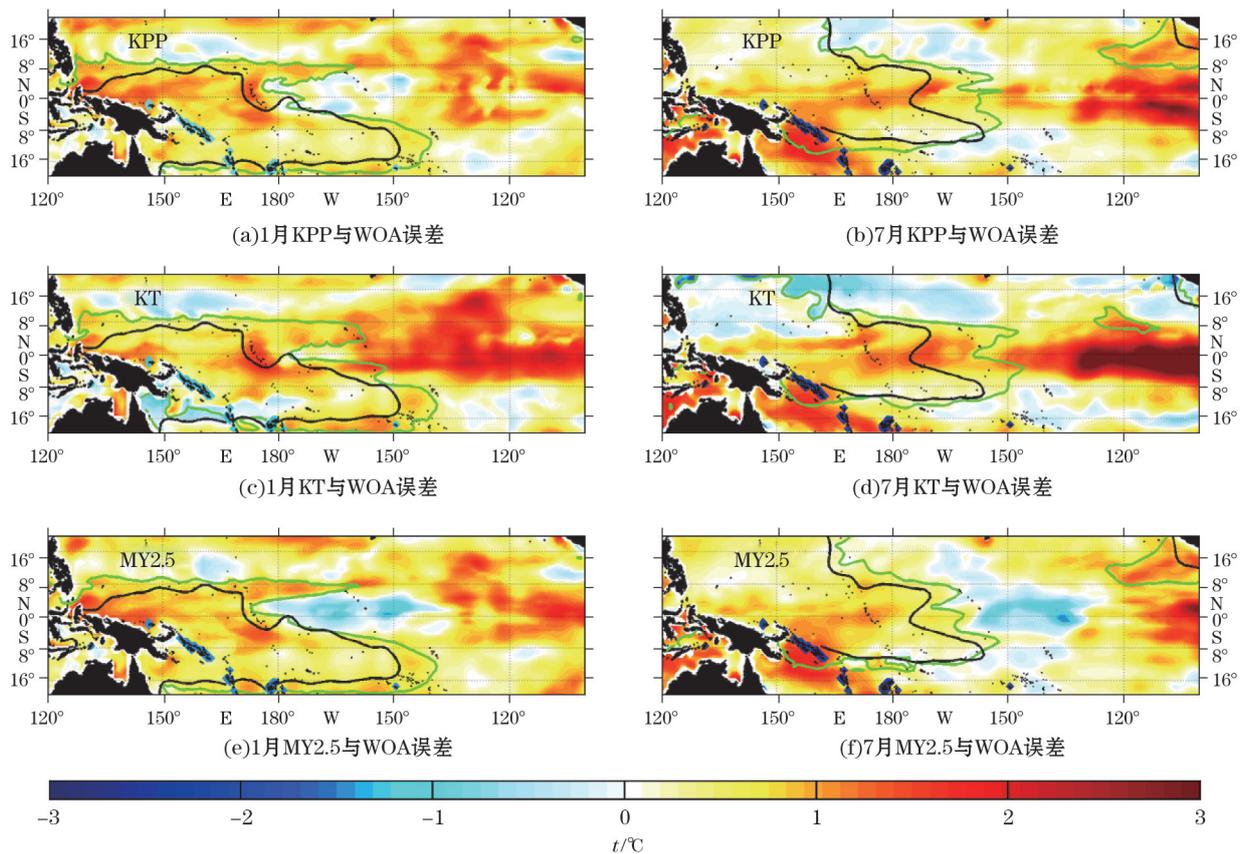


图 6 暖池区域 SST 误差及暖池范围对比

Fig. 6 Differences of sea surface temperature and the area of warm pool

由于 KT 方案没有考虑由风应力引起的上层海洋的热量再分布<sup>[7]</sup>,因此其模拟的东太暖水向西太的运输较弱,从而造成了东太 SST 较其余方案高,暖池区的 SST 较其余两种方案偏低。由于暖水西向运输减弱,因此冷舌区的上升流也相应变弱,冷水上涌受阻。因此造成了 KT 方案在东太模拟的混合层底偏浅,在

西太偏深,从而影响整体的尤其是温跃层内的模拟效果。这一效应在风应力较强的夏季(7月)更为明显(图6d)。由于混合层的深度自西向东逐渐变浅,由剪切不稳定造成的混合越来越重要,因此KT方案的模拟效果在西太平洋较MY2.5方案好,而随着混合层底的抬升,MY2.5方案的效果要越来越好。KPP方案模拟的SST误差较大的区域都出现在东太平洋上升流区域,考虑是由于其在混合层内模拟的垂向混合系数较实际偏小,尤其是在风场较强的情况下,偏小的程度更大。

在此基础上,还比较了暖池区域内( $120^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{W}$ ,  $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ )模拟的垂向温度同WOA数据的相关系数(图7),其大小代表了模拟的温度变化趋势与实际情况相似的程度。大体上看,3种混合方案模拟的SST均较好,相关系数都在0.85以上。随着水深的增加,相关系数逐渐变低。KT方案在温跃层内的相关系数偏低,这是因为该方案确定的混合层底不准确,从而影响到对其下温跃层内的模拟情况,在混合层下随着模式的逐渐调整,其模拟的效果逐渐靠近KPP方案。MY2.5方案与KPP方案模拟效果接近。

### 3.3 中高纬度海域模拟

为了对3种混合方案有更为深入的认识,以便在以后的研究中选择更为合理的混合方案,除了对比3种混合方案在低纬度海域的模拟效果外,还对3种混合方案在中纬度地区的温度模拟情况做了简单的比较研究,比较方法与前文类似,主要对比了特殊断面上纬向平均后的温度误差随时间的变化。

#### 3.3.1 $40^{\circ}\text{N}$ 温度差异

如图8所示,在北半球中高纬度太平洋海域(以 $40^{\circ}\text{N}$ 为例),3种混合方案的差距主要集中在200m以浅。KT方案(图8b)的模拟效果要明显优于低纬度海域,KPP方案和MY2.5方案的模拟效果几乎一致,在6—10月之间都持续出现了海表以下50m深度处的负误差。

在中高纬度,垂直剪切造成的混合相对低纬度较弱,因此KT方案在上层海洋的模拟效果得到很大改善。夏季,KPP方案模拟的SST偏高,其下的温度又偏低,这表明KPP方案计算的垂直混合系数偏小,从而使得混合相对较弱。

#### 3.3.2 $40^{\circ}\text{S}$ 温度差异

太平洋 $40^{\circ}\text{S}$ 断面纬向平均温度误差年循环如图9所示,KPP方案与MY2.5方案的最大误差发生在冬季,其与北半球在时间上的差异主要是由于海表面的太阳短波辐射造成的。

由于在南大洋中纬度海域常年盛行西风,风应力的搅拌作用十分明显,KT方案模拟出的混合更为彻底,即混合层底的深度更深,与北半球相比,KT方案模拟出的SST偏高程度更小,在11月至次年2月甚至出现了负误差。在混合层内,温度的误差也较小,但随着深度的增加,这个正误差在逐渐变大,这也说明了KT方案模拟的混合层深度较实际的而言偏大。而KPP方案与MY2.5方案几乎无差别。

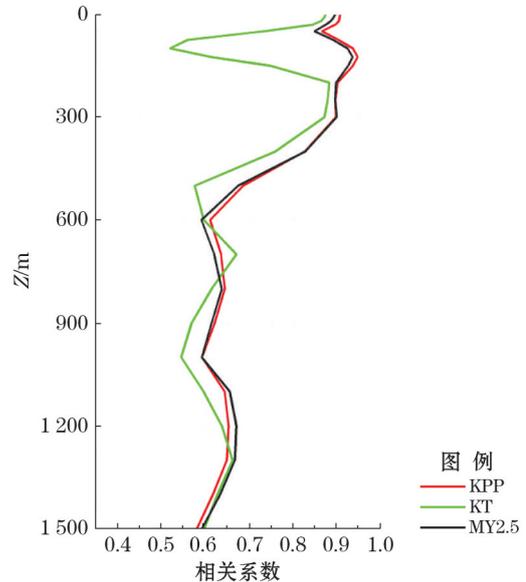


图7 西太平洋暖池区域模拟温度与WOA温度相关系数随深度分布

Fig. 7 Correlation coefficient between the simulated and WOA SST in warm pool

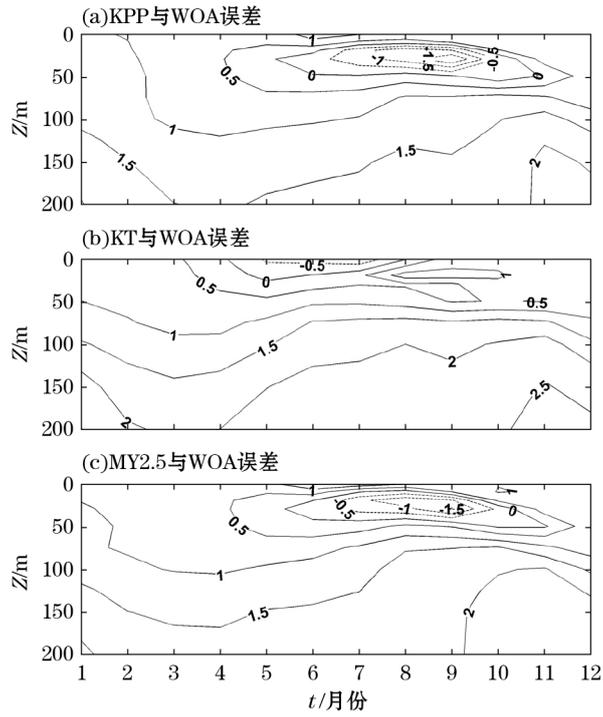


图 8 40°N 断面纬向平均温度误差(°C)年循环

Fig. 8 Zonal averaged temperature differences(°C) at 40°N as a function of depth and time

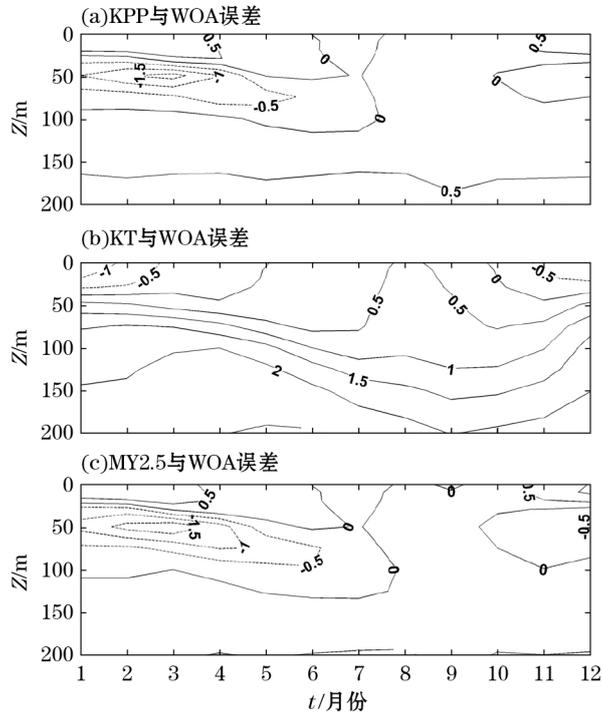


图 9 40°S 断面纬向平均温度误差(°C)年循环

Fig. 9 Zonal averaged temperature differences(°C) at 40°S as a function of depth and time

## 4 结 论

本文基于 HYCOM 设计了 3 个数值试验,分别采用 3 种不同的垂向混合方案对全球海洋进行了模拟,重点比较分析了它们对全球的温度水平分布,热带海域以及中高纬度海域的模拟能力。结果如下:

1)对于 SST 的模拟 3 种混合方案均表现较好,但随着深度的加深,KT 方案的不足也越来越明显,尤其是对温跃层的模拟效果,较其它两种方案误差更大。而 KPP 和 MY2.5 方案,在中低纬度的表现要较高纬度好。从相关系数图上看,整个全球范围内比较,KT 方案在中高纬度的表现要比低纬度好,这主要是因为其忽略了上层海洋对风应力的响应,没有考虑由风引起的上层海洋的热量水平再分布<sup>[9]</sup>。

2)通过对 3 种混合方案在赤道断面和暖池区域模拟能力的对比,我们可以得到,KT 方案模拟的混合层深度较其他 2 种方案整体偏深,且随着风应力增强和实际混合层深度的加深,这一问题更为明显,这也就造成了 KT 方案在模拟 SST 时误差较小,但随着深度的加深,误差逐渐增大,直至温跃层内达到最大。KPP 方案和 MY2.5 方案对温度场的模拟效果差别不大,但在流场的模拟上,MY2.5 方案的就暴露出其不足,这是因为该方案要求比较高的垂向分辨率。

3)通过 2 个中高纬度纬向断面(40°N 和 40°S)的温度误差的对比结果,可以看出 KT 方案的垂向误差较热带区域要小很多;KPP 方案与 MY2.5 方案的结果十分相似,均在南北半球对应夏季的时候出现了负的温度误差极大值,深度均在 50 m 以深,且持续时间为 2 个月左右,负误差的出现主要是因为模拟的混合程度偏弱,混合层底较浅造成。

4)KPP 方案与 MY2.5 方案在温度场的模拟能力上不相上下,尤其是在中高纬度海域。在热带海域,MY2.5 方案在某些方面要稍优于 KPP 方案,尤其是在对垂向温度分布模拟上,但 MY2.5 方案对于流的模拟要比 KPP 方案差很多,考虑是因为 MY2.5 方案对于垂向分辨率的要求较高造成。KT 方案在中高纬度的模拟能力要明显强于其在低纬度的模拟能力,这与前人的研究也是相符的<sup>[5,13]</sup>。综上所述,KPP 方案是三种混合方案中表现最好的。

### 参考文献(References):

- [1] LI X, CHAO Y, MCWILLIAMS J C, et al. A comparison of two vertical-mixing schemes in a Pacific Ocean general circulation model[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(7): 1377-1398.
- [2] SHU Q, QIAO F L, SONG Z Y. Model result comparison between two vertical-mixing schemes in a global ocean general circulation model [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(1): 17-23. 舒启, 乔方利, 宋振亚. 垂直混合方案对全球海洋环流模式模拟结果的影响对比研究[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(1): 17-23.
- [3] CHEN D, ROTHSTEIN L M, BUSALACCHI A J. A hybrid vertical mixing scheme and its application to tropical ocean models[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24(10): 2156-2179.
- [4] HALPERN D, CHAO Y, MA C C, et al. Comparison of tropical Pacific temperature and current simulations with two vertical mixing schemes embedded in an ocean general circulation model and reference to observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1995, 100(C2): 2515-2522.
- [5] HALLIWELL G R. Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the HYbrid-Coordinate Ocean Model (HYCOM) [J]. *Ocean Modelling*, 2004, 7(3): 285-322.
- [6] BLEEK R, HALLIWELL G, WALLERAFT A, et al. Hybrid Coordinate Ocean Model(HYCOM) User's Manual; Details of the numerical code[EB/OL]. (2002-05-01)[2015-05-07]. <http://hycom.rsmas.miami.edu>.
- [7] KRANS E B, TURNER J S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline[J]. *Tellus*, 1967, 19: 89-105.
- [8] PRICE J F, WELLER R A, PINKEL R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1986, 91(C7): 8411-8427.
- [9] PACANOWSKI R C, PHILLANDER S G H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(11): 1443-1451.

- [10] MELLO G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(4): 851-875.
- [11] 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.
- [12] CANUTO V M, DUBOVIKOY M S. A dynamical model for turbulence-I. General formalism[J]. *Physics of Fluids (1994-present)*, 1996, 8(2): 571-586.
- [13] KARA A B, HELBER R W, WALLCRAFT A J. Evaluations of threshold and curvature mixed layer depths by various mixing schemes in the Mediterranean Sea[J]. *Ocean Modelling*, 2010, 34(3): 166-184.
- [14] LI Y, QIAO F, YIN X, et al. The improvement of the one-dimensional Mellor-Yamada and K-profile parameterization turbulence schemes with the non-breaking surface wave-induced vertical mixing[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(9): 62-73.
- [15] TAFT B A, HICKEY B M, WUNSCH C, et al. Equatorial undercurrent and deeper flows in the central Pacific[C]// *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Elsevier, 1974, 21(6): 403-430.
- [16] LEI J, YANG H J. Research on the sensitivity of global ocean circulation to vertical diffusivity[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(6): 864-870. 雷霖, 杨海军. 海洋垂直混合系数对大洋环流影响的敏感性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(6): 864-870.
- [17] MILLER A J, CAYAN D R, BARNETT T P, et al. Interdecadal variability of the Pacific Ocean: Model response to observed heat flux and wind stress anomalies[J]. *Climate Dynamics*, 1994, 9(6): 287-302.
- [18] KARA A B, METZGER E J, HURLBURT H E, et al. An eddy-resolving ocean model for the Pacific Ocean: Part 1: Deep convection and its relation to SST anomalies[J]. Submitted to *Journal of Geophysical Research*, 2007.
- [19] SHAJI C, WANG C, HALLIWELL G R, et al. Simulation of tropical Pacific and Atlantic Oceans using a hybrid coordinate ocean model [J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9(3): 253-282.
- [20] WEBSTER P J, LUKAS R. TOGA COARE: The coupled ocean-atmosphere response experiment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(9): 1377-1416.
- [21] WANG C, ENFIELD D B. The tropical Western Hemisphere warm pool[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8): 1635-1638.
- [22] QIAO F L, YUAN Y L, EZER T, et al. A three-dimensional surface wave-ocean circulation coupled model and its initial testing[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(5): 1339-1355.

## Effects of Three Vertical Mixing Schemes on HYCOM Performance

LI Li, WANG Yan, WANG Yu

(College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Performance of three different kinds of vertical mixing schemes are compared using the HYCOM. The three schemes are K-Profile Parameterization (KPP) scheme, Kraus and Turner (KT) scheme and Mellor-Yamada level 2.5 (MY2.5) scheme, respectively. In extra-tropics, the performances of KPP and MY2.5 schemes are similar in simulating temperature fields, while in tropical ocean, MY2.5 performs better, in particular in the equatorial region and the Western Pacific warm pool. However, as to the simulation of the EUC, KPP scheme is significantly better than MY2.5 scheme and MY2.5 scheme is the worst one among the three schemes. The performance of KT scheme depends on whether the MLD is prescribed correctly or not, and its simulation of temperature field is more realistic in extra-tropical ocean than in tropical ocean. In general, KPP scheme has better performance in the tropical ocean, which is much close to observation, while in extra-tropical ocean there is little difference between KPP and MY2.5 schemes, and KT scheme have a better performance in this region compared with its result in tropical ocean.

**Key words:** vertical-mixing scheme; K-Profile Parameterization; Kraus and Turner scheme; Mellor-Yamada level 2.5; HYCOM

**Received:** May 7, 2015