# 非结构网格WW3模式的发展历程

## 波浪模型的发展

波浪在近海岸区域的变形最显著，因此使用非结构三角形网格是发展趋势。但非结构网格上使用显格式求解波浪方程，计算时间步长受CFL条件限制，需要发展新的隐式求解算法与并行化方法。

可认为TOMAWAC模型(Benoit et al., 1997)是第一次尝试在非结构网格上求解波动方程，使用semi-lagrangian方法，Roland (2009)评述了其优缺点。

跟随Benoit et al. (1997)，Liau (2001)开发了第1版的Wind Wave Model (WWM)，基于Crank-Nicholson Taylor Galerkin法），WWM使用结构网格和分裂步模式。还有在非结构网格上利用隐式求解Liau (2001)。模式验证参考Hsu et al. (2005)和Roland et al. (2005)

Liau, J., 2001. *A Study of Wind Waves Hindcasting on the Coastal Waters*.. Ph.D. thesis PhD Thesis National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

Roland, A., Mewis, P., Zanke, U., Ou, S., Hsu, T., Liau, J., 2005. Verification and improvement of a spectral finite element wave model, waves 2005, ASCE/COPRI. In: Edge, Billy (Ed.), The Fifth International Symposium on Wave Measurement and Analysis. Madrid, Spain.

随后，Roland et al. (2006)和Zanke et al. (2006)引入波动分裂法到WAE，进一步开发WWM，最终引出第2代WWM模式(Roland et al., 2008)，该工作考虑和验证了显格式与隐格式波动分裂格式求解WAE的精度。WWM-II进一步与2D和3D水动力模式耦合(Roland et al., 2012)，其中分裂格式采用区域分解技术做了并行化。

同时，Zijlema (2009)也做了相似的努力，开发了基于结构网格的Simulating Waves Nearshore Model (SWAN)模型，SWAN采用全隐格式，不依赖任何形式的方程分裂，并在三角形非结构网格重新实施了SWAN模式。SWAN模式进一步与ADCIRC模式耦合(Luettich et al., 1992)，使用Ike飓风测试了模式性能(Hope et al., 2013)。SWAN模式的并行性在9000+计算核心上使用区域分解算法做了测试(Dietrich et al., 2012)。

Abdolali et al. (2020)跟随Roland et al. (2012)的工作，对WWM3实施新的区域分解算法，允许更有效地分配计算负荷到计算节点上，克服scalability问题，可以运行在百万量级的网格单元上。

WW3模式可以在NUOPC框架下运行(Moghimi et al., 2019)，是基于ESMF(Theurich et al., 2016)。

新实施的隐格式求解允许在近海岸区网格分辨率降低至10~50m，可以在多个模式之间求解近海岸物理过程，可输出更好精度的结果(WW3DG, 2019)。

WW3DG, 2019. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07, the WAVEWATCH III Development Group. Tech. Note 316. NOAA/NWS/NCEP/MMAB url:

https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/files/manual.pdf

## WW3研发

使用隐格式的WW3放弃了分裂方法，离散方程组整合为一个大型系数矩阵，存储为CSR (Column-Sparse-Row)格式，忽略矩阵中的0元素。方程组采用block-gauss-sediel法求解，采用非阻塞通信的区域分解并行化。分区使用ParMetis。具体实施细节参考WW3DG手册。

数值格式

基于非结构三角形网格的WW3的数值格式是基于Contour Residual Distribution (CRD)的空间离散方法，与WWM-II类似(Roland, 2009)。

如果选择使用显格式求解，需要使用4个时间步长分别求解全局、空间传播、相间传播和源汇项。在地理空间上基于非结构网格，使用原始的分裂步方法求解2D双曲部分，而spectral部分和源汇项以与结构网格WW3相似的分裂步方法积分。也可选择隐格式求解对流项。但Roland (2009)和Roland and Ardhuin (2014)发现这种方法对分裂误差非常敏感，因此导致空间对流、源项和谱对流之间的分裂误差与时间步长相关性很强。注意：由于分裂误差，分裂步方法是时间步长相关的。这种相关性控制着时间步长，特别是在浅水区域(Roland, 2009)。

尽管非结构网格的WW3的显格式求解与结构网格的WW3类似，但非结构网格部分的子迭代次数，是基于最大CFL数自动评估的。这样，最小的网格分辨率控制着时间步长，因为它增加了最小单元网格上的迭代次数。因此，对于高分辨率情况，隐格式变得没有效率。另一方面，对于隐格式方法，线性方程组是基于CRD-N格式整合的(Roland, 2009)。使用简单的1阶迎风隐格式求解谱传播，源项以与WW3相同的动力格式的矩阵形式，基于Patankar准则整合方程组。不像显格式，隐格式仅需要全局时间步长，其他时间步长不再影响计算精度。Abdolali et al. (2020)的研究是：定量评估在多大程度上，增加时间步长，不会影响深水区和浅水区的模拟精度。

显格式时间步长取(150, 100, 50, 10 s)，而隐格式取60和600s。在所有模拟中，模型以0.05~0.9597Hz的频率求解源谱。为考虑远距离涌浪的效应，在计算区域的开边界节点上施加边界条件，边界条件提取自全球模拟。另外，还考虑波浪间的相互作用（使用离散的相互作用近似），DIA，移动底部摩阻、水深限制的波浪破碎(Battjes-Janssen公式，DB1)、海岸反射(REF1) (Ardhuin and Roland, 2012)。

并行化

WW3有两种并行化方式：card deck(CD)和区域分解法(DD)。

CD法中，陆地计算节点被排除在外，不计算。模型网格的行列中的活动节点排序，进程间线性分配，如图4。非结构网格的CD算法好似随机的。CD法在结构网格上的效率已被证明(Tolman, 2002)。

WW3中还实施了混合并行（MPI+OpenMP）

## 驱动力

OWI（hindcast model）

HWRF(operational forecast model)

提取10m高度的风速（U10），与点源数据（浮标）和场观测数据（卫星测高）做比较分析。

## WW3验证

对大气驱动力的敏感性

对网格分辨率的敏感性

对并行化算法和数值格式的敏感性

对时间步长的敏感性

模型表现与scalability

## 结论

WW3模型处于下游，模拟精度取决于上游的气象模式（OWI和HWRF），需要通过数据同化和偏离校正获取更好精度的模拟结果。

# 参考文献

Ali Abdolali, Aron Roland, Andre van der Westhuysen, Jessica Meixner, Arun Chawla, Tyler J. Hesser, Jane M. Smith, Mathieu Dutour Sikiric. Large-scale hurricane modeling using domain decomposition parallelization and implicit scheme implemented in WAVEWATCH III wave model. Coastal Engineering 157 (2020) 103656