

地形 Rossby 波的实验模拟研究

孙宇辰，姚恒恺，孟静 *，曹勇，陈旭

(中国海洋大学海洋环境学院，青岛，266100，mengjing@ouc.edu.cn)

摘要：Rossby 波在海洋科学和大气科学中都是十分重要的一种波动，其作为一种行星尺度的波具有波长长，传播速度慢等特点，人们往往只能通过高度计等卫星遥感资料来大致了解这种波动，缺乏对其直观的认知。本文在前人经典实验的基础上，试图得到在实验室中模拟 Rossby 波和验证海上涡旋一些性质的试验方法，并给出一些如何得到更好模拟结果的经验。实验在中国海洋大学地球旋转试验台上进行， β 平面近似通过设计不同斜面的旋转圆锥水槽和带有斜坡的方形水槽来模拟科氏参数随纬度的变化。通过改变水槽转速可模拟该波动的西向传播，通过在斜面上设置不同障碍物来产生波动，配合圆锥地形坡度的变化来模拟大洋中实际存在的各种海底地形（如大陆边缘、洋盆、洋中脊等）。并以此观察不同突起物对于 Rossby 波的运动轨迹的影响以及 Rossby 的生消临界状态和波形变化。实验中分别采用染色法和粒子图像测速技术（PIV）给出 Rossby 波波形及流场分布。

关键词：Rossby 波；实验模拟；染色法；粒子图像测速技术（PIV）

1 引言

Rossby 波是一种很有意义且又特别重要的波动。它是海洋内部的大尺度波动(波长为几百到几千公里)，主要是由于地球的旋转和形状引起的。Rossby 波在全球海洋动力过程的调整中发挥着关键作用，被视为海洋响应大尺度大气强迫的关键动力过程之一；不仅使能量从东向 西传播，维持中纬度地区的环流，而且使能量在西边界堆积产生了强的西边界流，如黑潮、湾流、东澳大利亚流等^[1]。因此在实验室中 Rossby 波的模拟就显得十分有意义。

2 实验仪器

实验在中国海洋大学小型地球旋转试验台中进行（图 1），试验台上方为一摄像头，分辨率为 1024×1024 ，相对于水槽静止，左侧为一升降台，上固定一台可打出一水平扇面的

激光。试验台各主要部分均由型材构成，可自主对摄像头和激光器的位置进行调节。

实验中使用一方形水槽，和相同材质的一各圆柱侧面，将圆柱侧面放入方形水槽即为圆柱形水槽（图 2）。采用方形水槽时，在其中放入不同规模的长方形平板，使水槽带有不同倾角的斜面以模拟不同的 β 平面近似。采用圆柱形水槽进行实验时，类似地，用斜率不同的圆锥底面进行模拟，逆时针旋转水槽时可起到模拟整个北半球带有科氏力的运动（图 3）。

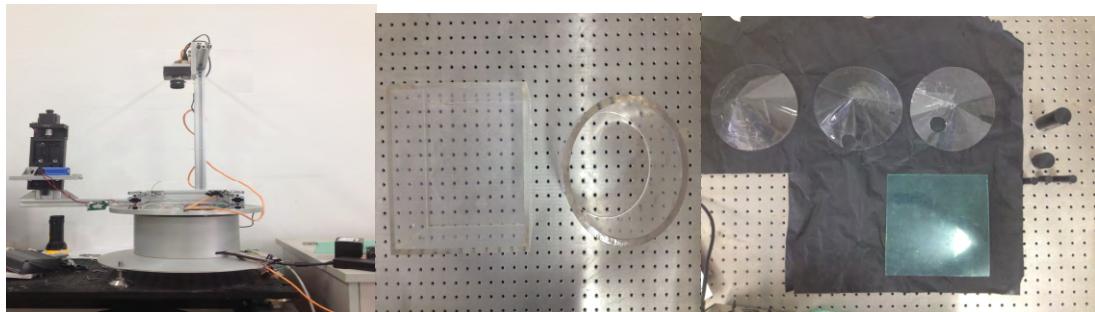


图 1 地球旋转试验台

图 2 方形水槽和圆柱形水槽

图 3 底地形

3 实验原理

使用带斜面的方形水槽和底地形为圆锥的圆柱水槽作为模拟 Rossby 波的实验平台。由于地形效应与 β 效应在动力学上具有等价性，斜率恒定提供了 β 平面近似，所以能够在实验室中通过斜坡地形的应用来模拟真实地球的 β 效应，进而对 Rossby 波的现象进行模拟。在容器的浅水区域表示两极（北极），深水区域表示赤道。对于底地形为圆锥的圆柱水槽，圆锥中心代表两极（北极），圆锥底部边缘区域表示赤道。具体方法分别使用改变转速法和冰块染色法来产生 Rossby 波。

其中对于改变转速法，待流体刚化之后改变转速，流体经过地形扰动后发生变向。由于 β 效应的存在，平均流经过地形扰动后，相对涡度发生变化，由此产生纬向流，并由此激发 Rossby 波。所得到的实验现象与 Rossby 波形成机制的理论^[2]具有良好的一致性。采用圆锥或斜坡表面时，单纯改变转速很难引起扰动，故在其斜面上加上一个突起用于产生扰动。类比真实的海洋现象，突起则相当于洋脊。试验中采用圆柱来模拟这一现象，并通过圆柱的尺寸，模拟不同的海底地形，进而探究最适宜产生 Rossby 波的条件。

在观测实验结果时可以采用染色法或粒子图像测速技术 (PIV)。染色法可以直接从侧边注入染料或采用染色冰块来实现。但若是从侧边注入染料，染料的流动对水槽中的流体是一个扰动，产生的涡旋不同说明就是 Rossby 波。采用染色冰块时，由于水的温度较冰块高，冰块在随流体运动时会较快的融化，虽然在水平方向上可以大面积的染色，但由于融

化产生的冷水的密度较周围水的密度大，会产生一下沉的垂向流动，这种垂向流动也会对其产生扰动进而生成涡旋。而 PIV 法只需激光找到相应平面并用摄像头拍摄，不会对流动产生影响，故在改变转速法模拟 Rossby 波的试验中不宜采用冰块染色的方法而选用粒子图像测速技术。

考虑到实际中地球的转速并不会改变，且 Rossby 波的产生也不是因为科氏参数的突然变化，因此还需设计一种更贴近现实的实验方法。

其中冰块染色法，使用含有色素的方冰块。从冰块上融化的有色冷水在水槽中下沉，由角动量守恒原理得冰块的旋转方向相对水槽的旋转方向一致，因而产生气旋式环流。在理论上我们将 Ertel 定理应用到浅水区，存在涡度守恒：

$$D\left(\frac{[\nabla \times u + 2\Omega]}{H}\right)/Dt = 0 \quad (1)$$

其中 u 为流矢量， ω 为旋转矢量， H 为局地流体深度。因此对于小 Rossby 数下的流动有

$$D(\nabla \times u)/Dt = DH/Dt 2\Omega/H \quad (2)$$

考虑到如果 $DH/Dt < 0$ ，则在垂直方向上有 $D(\nabla \times u)/Dt|k < 0$ ，即生成反气旋式涡旋；类似的，若 $DH/Dt > 0$ （液柱拉伸），则有 $D(\nabla \times u)/Dt|k < 0$ ，即生成气旋式涡旋。

PIV 技术的基本原理是：在流场中散播示踪粒子，用脉冲激光片光源照射所测流场区域，通过连续 2 次或多次曝光，粒子的图像被记录在底片上或 CCD 相机上，摄取该区域粒子图像的帧序列，并记录相邻 2 帧图像序列之间的时间间隔，进行图像相关分析，识别示踪粒子图像的位移，从而得到流体的速度场。^[3]

4 改变转速法对 Rossby 波的模拟

该实验需要一个圆柱来产生扰动，因而需要一个较大的模拟区域。底地形采用圆锥进行模拟时，整个圆周都为模拟区域，符合这一要求。采用方形水槽时，效果并不明显。

在实验中可以改变的变量有：圆锥底地形的倾角、圆柱障碍物的尺寸（长短）、扰动是由旋转台加速还是减速产生的以及转速改变的多少。

实验时应满足单一变量原则，首先给出大倾角和小倾角圆锥得到的流场分布图，从大倾角的圆锥产生的流场分布图中可以清晰的看到有几个明显的波动周期，各周期波峰波谷十分明显。



图 4 小倾角下的 Rossby 波模拟结果

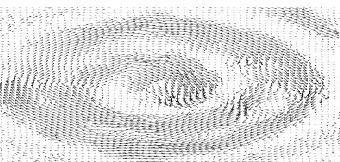


图 5 大倾角下的 Rossby 波模拟结果

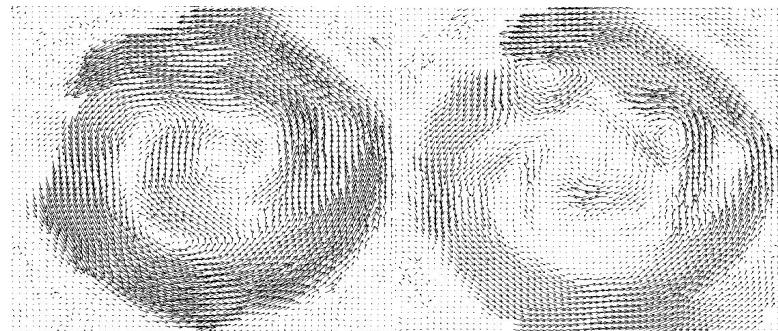


图 6 短圆柱下的 Rossby 波模拟结果

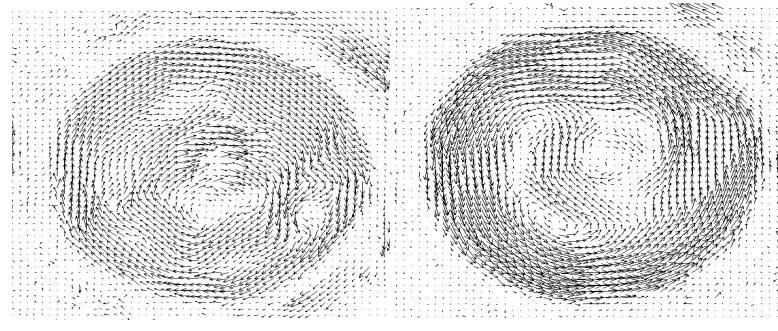


图 7 长圆柱下的 Rossby 波模拟结果

图 8 加速下的 Rossby 波模拟结果

图 9 减速下的 Rossby 波模拟结果

实验中圆柱形水槽的内径为 18.1cm，现在给出在激光照射高度为 9cm 时，高为 5cm 和 8cm 的圆柱障碍物的扰动下得到的流场分布。从中可以看出高的圆柱障碍物更有利于 Rossby 波的产生。

实验室中转台的旋转方向为逆时针，突然加速时由于惯性，流体在摄像头中显示的流动方向为顺时针，对应到地球上为自东向西，与地球自转方向相反。反之，若为减速，则流体相对于水槽的流动为逆时针，即自西向东，更加便于观测西向传播的 Rossby 波。

在实验中不要让背景场流速掩盖 Rossby 波的运动，实验中发现改变转速在 5r/min 以内会有比较好的效果。

综上，在底地形为圆锥的水槽中利用改变转速法对 Rossby 波模拟的实验结果见表 1。

表 1 改变转速法对 Rossby 的模拟结果

	效果明显
圆锥倾角大小	较大的圆锥倾角
障碍物的尺寸	较高的障碍物
改变转速的大小	改变较小的转速
加速/减速	减速

经过多组实验，可确定在本转台上当圆锥倾角为 45° 时，利用 8cm 的圆柱作为障碍物并减速较小时，可得到较好的模拟结果。

5 冰块染色法对 Rossby 波的模拟

采用冰块染色法时，主要通过冰块自身的旋转和染色流体的扩散状态来观察 Rossby 波。理论上冰块染色法可以采用两种水槽进行模拟，但在用底地形为圆锥的圆柱形水槽进行试验时，若器材较小，放入冰块时很容易贴在水槽的壁上，阻碍冰块的运动。因此在运用冰块染色法进行试验时，建议使用带有斜坡的方形水槽，会有较好的实验结果。

借助冰块染色法直观的效果和无需改变转速的特点，我们来探讨旋转速度与模拟效果的关系。

实验中分别在 12r/min 和 15r/min 的转速下进行模拟发现染色冰块在两种转速的水槽中都会做气旋式旋转并做自东向西的运动，其中 12r/min 时冰块旋转更明显，其西向运动的速度也更大一些。这可能是由于在转速较大的情况下，受到冰块融化的扰动时更易产生涡旋，影响 Rossby 波的传播。另外，在多次改变斜坡倾角后发现，斜率为 0.5 的斜坡有着较好的模拟效果^[4]。

下图是冰块在带有斜坡的方形水槽中运动的过程，从中可以明显看出冰块的旋转及其西向的传播，从染料产生的尾迹中也可发现类似的运动。

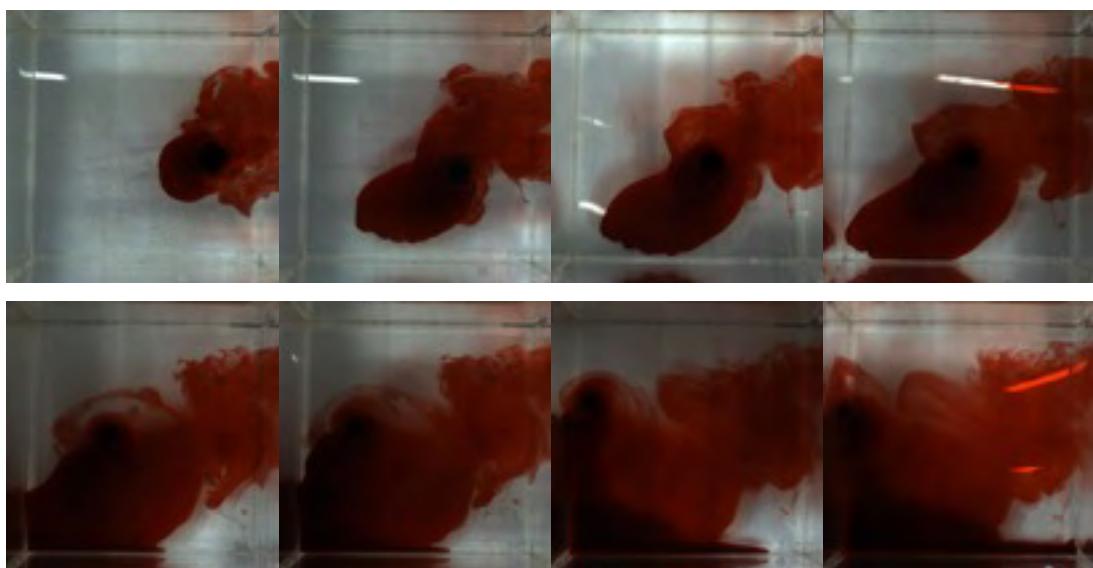


图 10 冰块在带有斜坡的方形水槽中运动的过程

6 讨论

在实验过程中有很多需要注意的问题，对某一因素的忽视往往会影响饰演的结果甚至使实验失败。下面简述一些我们在实验中遇到的一些问题。

在用 PIV 测速时，首先要调配浓度适中的 PIV 粒子溶液。用食用盐调配即可，但要注意粒子浓度不能过大，否则在激光照射时会产生较大散射使视野亮度过大，后期分析时看不到粒子，无法进行测速。摄像头要尽量放在转台的转轴处，因为水槽中流体的刚化需要水槽的中心尽可能与转轴重合，这样也方便使之出现在视野中心。激光打出的光为一水平平面，需要事先调平，并调节相机焦距使之看清激光所在平面。并要注意激光应打在底地形和障碍物之上，以防其在激光的照射下产生阴影，影响视野。

在流体刚化之前应调平旋转台，否则会影响刚化时间。判断是否刚化可在水槽中撒上细小的悬浮物（如纸屑），观察其是否与水槽相对静止，或采用 PIV 测速技术。

水槽的下方建议垫上一黑色的背景，方便摄像头的拍摄。

染色冰块时，应尽量加大染料的比例，并适当提高水槽中水的温度，否则实验时可能看不到染料的水平扩散。

7 结论

本次实验分别采用改变转速法和冰块染色法在实验室中对 Rossby 波进行模拟，得到了较理想的模拟效果。试验中应用粒子图像测速技术及用圆锥、斜坡和圆柱等器材模拟的底地形对 Rossby 形成的各种因素进行了研究。发现在改变转速法中当圆锥倾角为 45° 时，利用 8cm 的圆柱作为障碍物并减速较小时，可得到较好的模拟结果；在染色法中，采用斜率为 0.5 的斜坡并使背景流速在 12r/min 左右时有较好的模拟效果。此外本文还给出了实验中的一些注意事项，以提高实验的成功率。

参 考 文 献

- 1 Yongchui Z, Lifeng Z. 北太平洋 Rossby 波研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1219-1228.
- 2 王斌,翁衡毅.地球流体动力学导论[M].北京:海洋出版社,1981: 78 -140.
- 3 徐玉明, 迟卫, 莫立新. PIV 测试技术及其应用[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 101-105.
- 4 张晓爽, 吕红民. 利用旋转平台模拟 Rossby 波现象的实验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(Sup): 009-015

A study on topography Rossby wave simulation

SUN Yu-chen, YAO Heng-kai, MENG Jing, CAO Yong, CHEN Xu

(CEPO, Ocean University of China, Qingdao, 266100.

Email: mlxie@mail.hust.edu.cn)

Abstract: Rossby Wave is a sort of planetary-scale wave with major influence in marine science and atmospheric science. It has long wavelength and propagates slowly. People can only study it through statistics from altimeter and other satellite remote sensing technology and lack intuition acknowledgement. This article is based on preceding experiments. We strive for some measures on imitating Rossby wave in the lab and testing oceanic eddy, as well as some experience on how to imitate Rossby wave more accurately. The experiment is performed on OUC earth rotation experiment table. Beta plane simulated variation on Coriolis parameter approximately by designing cone and square rotation tanks with several slopes. By controlling the rotation speed of the tank, we can imitate westward transmission process. We can also imitate it by placing different obstacles to create waves as well as changing slopes of cone to stimulate submarine topography. We observed the effect of different obstacles on formation and disappearing, motion curve and shape of Rossby wave. Staining and PIV method are adopted in the experiment to show shape and distribution of Rossby wave.

Key words: Rossby wave; Simulation; Staining method; PIV.