

大气模拟实验简介

中国科学院大气物理研究所模拟实验组

大气模拟实验是在实验室条件下，控制影响大气运动的主要因素、研究这些运动的发生发展规律，以帮助人们了解发生在实际大气中的气象现象的一种手段。用模拟实验研究大气运动规律至今已有一百多年历史，现有数值模拟、电模拟和流体力学实验模拟等方法。本文只介绍后面一种方法。

流体力学模拟实验的范围很广。一百多年来国内外实验工作者已用气体、液体和磁流体对气象、海洋、行星大气中的某些现象进行了一定程度的模拟研究。仅就地球大气的模拟实验而言，又由于运动尺度不同分以下几类：分子或类分子尺度运动的模拟实验、大气湍流运动的模拟实验、中小系统的模拟实验和行星尺度的大气环流模拟实验。

模拟实验比起直接研究复杂的大气现象来说具有实验条件易于控制、便于单因子分析、现象容易重复、观测方便等特点，它对人们了解实际大气的运动规律起到解释、验证和启示的作用。由于模拟实验是按一定的理论或气象实际建立的大气模型，现在还不能全盘无误地与实际一致，因此很难直接作为预报工具。根据多年实验结果和目前的技术能力，一般认为，模拟实验研究可以起到以下几方面的作用：

(1) 发现新事实，或指导人们到大气、海洋运动中去发现新的现象。例如在模拟实验中，先发现了类似大气边界层的流体爱克曼层内的不稳定现象等。

(2) 验证理论。例如海德 (Hide) 进行的斜压不稳定波的实验证实了伊迪 (Eady) 大气波动的斜压不稳定理论。

(3) 进行单因子的、条件可控制、可重复的实验和理论研究。这种研究可以为寻找预报指标和天气控制的主要因子提供线索，也可以配合实际大气的数值试验研究。

(4) 解释已发现的天气事实。对于在实际中发现的一些天气事实，可以在模拟实验中再现，并从实验中研究出现这些天气事实的原因和条件。

一、实验装置及观测技术

对于不同的实验目的和模拟对象，人们设计了不同式样和不同大小的实验装置。这里只介绍一种可以模拟行星尺度大气环流和中、小系统的实验装置。这种装置基本上由三部分组成：

(1) 模拟地球自转的转台。

(2) 实验工作盘。

(3) 实验结果的显示和温度、速度测量系统。

图 1 是大气物理所的模拟实验装置示意图。转台的直径为 1 米。转台旋转周期可调范围为 3 秒到 140 秒，转速稳定度达千分之二左右。

进行大气环流实验的工作盘是一环状平底圆盘。试验用的工作介质是水和甘油的混合物。示踪物质为同比重的乳白色塑料小球，直径为 0.5—1.0 毫米。环状圆盘设有内筒和外筒，内筒以冰水混合物作为冷源以模拟极地，外筒的外壁用可自动控制温度的水浴作为热源，以此来模拟赤道。内筒与外筒之间为实验工作区，此工作区相当于地球半球。工作介质的深度为对流顶的高度。

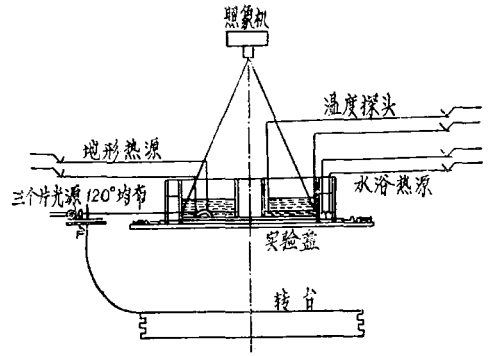


图 1 模拟实验装置示意图

温度测量用微型半导体热敏元件作为感应元件，并用自动平衡笔尖记录式电位差计和巡回检测仪记录温度。实验中的流场测量是以片光源（片光的厚度为 0.5 厘米）照亮示踪质点，用暗场照相法测定的。在实验时可以分别测定上、中、下三层的流场。

为了使模拟实验中出现的现象与模拟对象相似，必须按照相似理论的要求建立实验模型，使实验模型与原型之间满足各个相似条件（几何相似、边界条件相似和动力相似等）。实验中所选流体的运动要满足与大气运动相一致的方程组，而且其中主要的相似参数在数量级上要相等。在实验中要使所有的相似参数都得到满足是不可能的，也是不必要的，根据模拟对象的主要特征满足主要参数就可以了。对于大气环流的模拟实验，主要选择合适的转台转速 Ω 和冷热壁温差 ΔT ，使得热力罗斯培数 R_{OT} 和泰勒数 T^* 相似。

$$R_{OT} = \frac{g\epsilon\Delta Th}{2\Omega^2 r_0 \Delta r}$$

$$T^* = \frac{4h^4 \Omega^2}{\nu^2}$$

其中 g 为重力加速度， ϵ 为工作介质的热膨胀系数， h 为介质深度， r_0 为外筒半径， Δr 为内外筒半径差， ν 为工作介质粘性系数。

二、模拟实验的主要成就

在旋转流体的基本实验方面，富尔茨 (Fultz)、海德等做了很多工作。他们在实验中发现，在不同的冷热壁温差 ΔT 和不同转速 Ω 条件下，自由旋转流体流场存在四个稳定区域 (见图 2)。

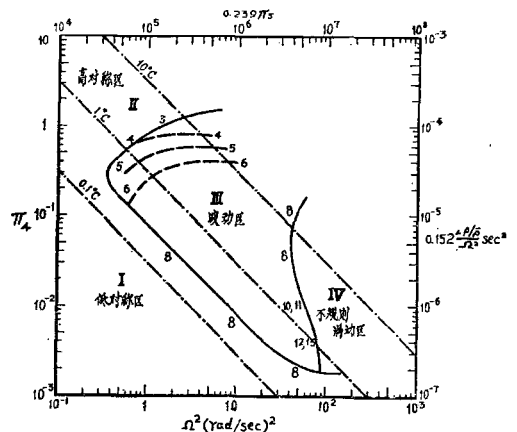


图 2 波谱图 (海德, 1965)

$$\text{图中 } \pi_4 = \frac{gh\Delta\rho}{\Omega^2(\Delta r)^3}, \quad \pi_5 = \frac{4\Omega^3(\Delta r)^5}{\nu^2 h}$$

曲线上的数字表示波数。

(1) 低温差、低转速时得到低对称区。流场呈纬向，但西风速度极低。

(2) 高温差、低转速时得到高对称区。这时纬向西风流速很大，流场呈同心圆形。

(3) 中等转速、中等温差时得到类似大气的长波和超长波的斜压波动区。这些波动可

以是稳定波，也可以是波数，波幅和波形变化的不稳定波。

(4) 高转速下的不规则涡动区，这时稳定波动破坏成大大小小的涡旋。

实际大气的罗斯培数和泰勒数始终处于图 2 中的斜压波动区，不管冬季或夏季，大气都是处于斜压不稳定状态，盛行波状或涡状气流。至于另外几种流场状态在其他行星大气中也许是可能存在的。这些实验结果使我们认识到地球大气的状态只是罗斯培数和泰勒数在一定变化范围时的特殊状态，它还告诉我们，地球大气中大气环流的基本状态为什么是现有的我们观测到的状态，而不是别的状态。

由于在模拟实验中，当主要的相似条件得到满足时可以得到从流场外形、物理量分布、环流演变过程都与大气实际环流情况十分相似的结果。因此有不少人用模拟实验方法对气象问题进行研究。下面举一些例子来说明。

富尔茨曾在没有中心内筒的实验盘内得出流体的表面流场非常象北半球高空天气图（见图 3 和图 4），并且不难找到转盘内连续好几个盘日（在模拟实验中转盘转一周相当于一日，称为盘日）的流场对应连续好几天的天气图相似的例子。

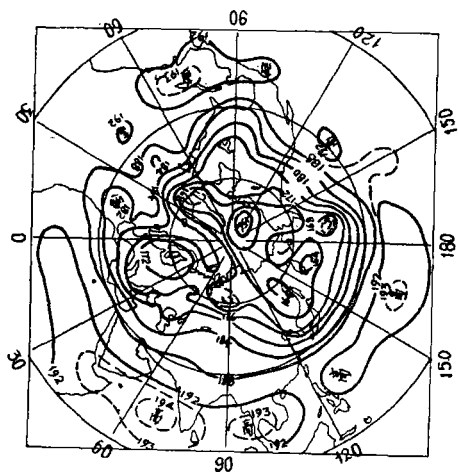


图 3 北半球500毫巴天气图1953年2月7日

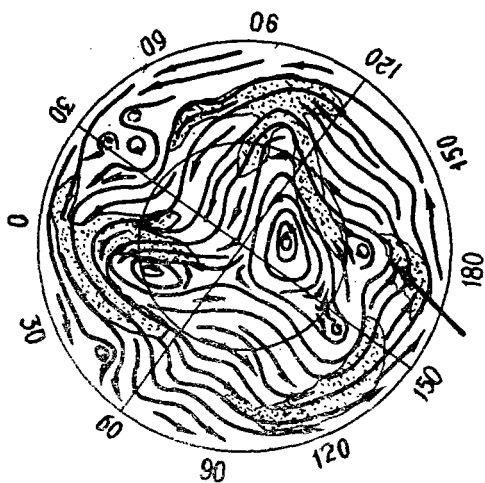


图 4 富尔茨实验所得到的相似流型

从模拟实验中还发现过非常类似实际大气中环流指数高低循环的摆动现象。在斜压波动区内，在一定的条件下，波动振幅发生规则的周期性变化。例如转盘内流型，从基本西风较强而槽脊振幅较小（对应于大气中高指数）的情况逐渐演变，槽变成东北—西南倾斜，不断加深，最后闭合切断，这时平均西风减弱（对应于大气中低指数），以后又恢复到最初强西风的环流形状。在不同实验中其循环周期约为 10—100 盘日，这种现象能够不断重复。而大气中高指数循环周期约为两个星期到 30 天。

还有人用两种不能混合的、密度不同的流体以机械方法使之转动，在合适条件下两种流体的交界面（相当于锋面）上产生波动（相当于极锋波动），该波动不断发展，并产生非常相似于大气中锋面波动的锢囚过程。

50年代到60年代富尔茨等人对斜压波动区的流场和温度场进行了测量，发现转盘中的急流长波、温度场结构、能量转换等与大气实况非常相似。

关于地形的作用，海陆分布对大气的影晌方面美国、苏联、日本都进行了一些实验工作，得出了与大气相似的平均槽脊分布。

在60年代末期和70年代初期美国张捷迁首先用气体作为介质，做了龙卷和台风的结构的模拟实验。

我国的模拟实验开始于1958年，在大跃进中，北京大学首先建成大气环流模拟实验室。进行了纬向非均匀加热对环流的作用等一系列实验。兰州地球物理所作了无旋系统中的小尺度地形扰动实验。1973年大气物理所模拟组进行了下述三个模拟实验工作。

(1) 青藏高原加热作用对夏季东亚大气环流影响的模拟实验。

我们知道，青藏高原夏季加热对东亚环流的形成有很大作用。我们用一个与实际成比例的半椭圆体作为青藏高原模型，高原表层内埋有加热电阻丝。在图1所示的圆盘内进行实验。实验结果表明，它对高原表面500毫巴热低压、高原上空100毫巴高压、高原南侧经圈逆环流及高原东侧的横槽切变线的形成均有直接的贡献。当高原加热到一定强度后，高原上对流猛烈发展，这些对流性系统是热量向上输送的主要媒介，也是高原附近对流层中层低压和高层高压、气旋性和反气旋性环流得以维持的一个原因。我们还发现，大槽经过加热高原时南部被切断，北部削弱东移，而在地形东北角都迅速发展一个涡旋，它与北部槽合并后形成槽的主体(见图5)。脊经过加热高原时得到加强(见图6)。



图5 槽经过加热高原被切断



图6 脊经过加热高原得到增强

(2) 西南低涡移动规律的模拟实验

西南低涡是我国长江流域一带降水的重要天气系统，所以研究西南低涡的移动规律有一定的实际意义。在实验中我们用机械办法产生涡旋、急流等。实验表明，不管有无切变线，低涡基本上沿着上层急流移动。

(3) 台风的模拟实验

台风模拟实验是在一个可以旋转的方形扁玻璃盘(水平尺度/垂直尺度=18)内，用气体作为介质进行的。在该实验中首次成功地用红外系统作为激发模型台风的热源，它加热于地面以上的整个空气柱，这更相似于自然台风的空间凝结潜热热源。用烟兼作示踪物质和吸热物质。实验中得到的台风流场结构与实际台风结构非常相似。台风上层外围为反气旋辐散气流，中部为气旋性辐合气流。中层为气旋性涡旋，下层呈螺旋性输送云带，三层都可以看

到明显的台风眼。图7是模拟实验中台风中层的流场照片。

我们还进行了我国东南沿海地形对移动中台风的影响实验，得到了一些有益的结果。例如，当台风从东南方和正东方向向台湾岛移动时，台风中心分裂为二：一在台湾海峡内，一在台湾省东侧（见图8）；然后台风继续移动，台风中心重又合并为一。这和我国一些预报员的经验是一致的。又如当台风中心接近我国大陆时，可以看到台风中心路径明显地向左偏，而且移动速度有明显的加快现象等。

虽然用模拟实验方法研究大气运动规律已取得不少成绩，但这种方法还是有一定的局限性。它很难全部重现大气原型，因此目前还难于直接用于天气预报。它只能抓住主要因子制造大气动力系统的一些模型，而且至今技术上还存在一定困难。例如要模拟气压、密度向上指数衰减的垂直分布是很难的，一般只能用不同密度的流体层来近似。另外，在地球重力场中制造另一个小范围的有心力场，因而要和地球大气一样进行球壳形的气体或液体实验也是很难的。

三、展 望

作为模拟实验手段之一，流体力学模拟实验必须和数值试验相结合，以利于互相补充互相检验和进行定量的研究。今后可以进行的工作很多，比较有意义的有：

(1) 结合我国特点，研究青藏高原对环流的影响，海陆分布对大气环流的作用。

(2) 设法研究大、中、小不同尺度系统的非线性相互作用及长期天气过程等。

(3) 观测上比较困难的领域：如大气边界层内的系统活动规律，对流活动等。

(4) 重力波、锋面波及惯性波振荡的实验。

(5) 重力波和涡旋运动的相互作用，有关适应过程的实验。

(6) 不规则罗斯培波动区的统计特征、波动转换的具体动力过程。

精细研究速度场和温度场的结构和变化过程将会给出有意义的结果。但这有赖于测量技术的进一步提高和精确化，同时也要进一步提高实验系统的稳定性，改善和丰富设备的模拟能力。

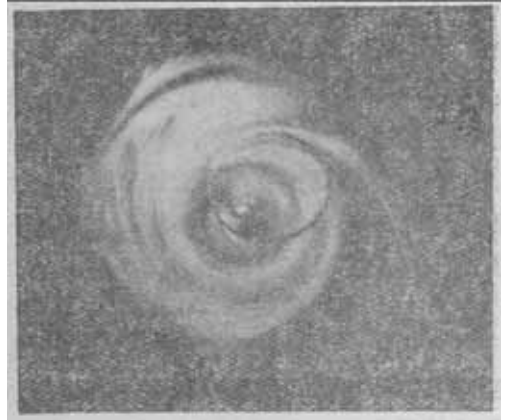


图7 台风模型中层流场图中圆圈为透过红外线的窗口



图8 台湾岛对台风影响的模拟实验图

当台风从正东方向向台湾岛移近时，中心分裂为两个：一个在台湾东南，另一个在西北。

图中流场为中层流场，左侧为我国大陆地形，圆圈为透过红外线窗口，紧靠圆圈的左下方为我国台湾省地形。