

数据模拟方法在湖泊学中的应用

吴 坚

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 210008)

一、引 言

我国湖泊众多, 极为丰富的湖泊资源在水产、水利、航运、旅游、水电等国民经济中占有重要地位。湖泊资源的开发与环境保护和预测正受到广泛关注。随着计算机和计算数学的发展, 数值模拟方法被广泛应用于大气、海洋、湖泊或水库等研究中。数值模拟方法就是借助于计算机, 对基于一定的观测事实和数学物理方法建立的数学模式进行数值计算, 从而对自然过程进行模拟和预测的方法。它使得湖泊学研究从定性和定量客观分析到定量模拟和预测。目前, 它是解决许多复杂的湖泊环境课题不可缺少的一种有力手段。本文评述的重点放在动力学研究方向。

物理湖泊学中数值模拟的雏形是 Defant (1953) 的定振波数学模型工作。直到 60 年代末、70 年代初才真正被应用于物理湖泊学的研究。首先应用的领域是湖泊环流的数值计算, 主要工作有 Liggett 的有限差分浅水均匀湖泊环流、Cheng 的有限元法伊利湖风生环流、Lee 等的层结湖泊环流和今里哲今的琵琶湖定振波等的数值计算工作以及 Simons 的安大略湖的水动力学数值模式工作⁽¹⁻⁸⁾。上述工作多被系统地反映在 Graf 等编著的水科学进展 II:《湖泊水动力学》、Simons 的专著《湖泊和内陆海的环流模式》以及有关湖泊的专题或综合研究文集, 如《琵琶湖湖沼学导论》等中。早期工作的特点是: 研究者既从事湖泊动力数值计算又从事海洋动力数值模拟工作, 如加拿大 Simons 和日本今里哲久、大西行雄等, 因而建立的模式可适用于湖泊或水库, 也可适用于海湾或大洋; 工作多为定常或非定常的湖泊环流等计算, 侧重模式设计和验证, 探讨基本的水动力学过程的物理机制和特点。这些工作都是以后发展的基础性工作。

但是, 湖泊资源的大力开发以及日益严重的环境问题的出现, 使得原有的数值模拟方法不能十分有效地解决不断出现的复杂课题, 如水质模拟和预测、电站等工程设计以及大型水利工程对湖泊环境影响的后效预测等。一个具体实例是: 国际大湖野外年中, 在安大略湖中的模拟十分成功, 模拟在近岸却遭受挫折, 而近岸正是污染物首先进入湖体、电站(主要指核电站)取水排水口设计中必须考虑的区域, 沿岸流场和扩散场规律更为复杂、难以模拟, 这是当时研究中的一个难点。为此, 大量研究者进行了不懈的努力。发展至今, 环流模式也较成熟, 已能解决三维问题; 近岸流场和扩散场模拟在大量实测或实验成果的基础上有了较大的发展。数值计算方法方面, 借鉴了许多大气或海洋学中的先进方法, 如嵌套网格技术、不规则网格有限差分技术、裂开算子法及边界有限元、有限分析法等⁽¹⁰⁻¹³⁾, 使得数值模拟方法能解决许多复杂的实际课题。当前, 以水动力学模式为框架, 与沉积动力学、污染物扩散、水生生态等模式相耦合, 数值模拟方法已渗透到了湖泊学研究的各个领域。近几年,

我国在湖泊水动力学数值模拟和水质规划中污染物浓度场数值计算等方面已开始了一定工作⁽¹⁴⁾。

此外, 物理湖泊学与大气动力学, 尤其是物理海洋学在研究对象和方法上有许多共同之处。结合海洋资源开发、环境保护以及港口设计、石油开采设施设计等课题, 国内外众多的物理海洋研究者在大洋环流和近海(包括海湾)的潮流及热水扩散、污染物扩散等方面做了大量的研究工作^(10, 18, 19), 很值得湖泊学研究者借鉴。反过来, 由于湖泊中边界条件明确, 影响因子少, 观测也较海洋方便, 模式更易验证。因此, 物理湖泊学的数值模拟研究对物理海洋学的数值模拟研究同样具有一定的意义。物理湖泊学中的数值模拟研究也必将促进相邻或交叉学科的发展。

二、物理湖泊学中的动力模式

物理湖泊学中的数学模式按解的性质分为确定和随机模式; 基于时间分成稳态(诊断)和动力两大类; 基于空间分成一维和多维(多层); 基于传输特性分充分混合、对流和对流扩散型; 基于模式作用的动力学则分为保守物质纯传输模式、非保守物质传输和反应模式和生物模式等。水动力学模式是一切模式的基础, 主要有整层积分模式和多层模式。前者可适用于垂直混合强烈、不存在明显密度层结的浅水湖泊, 如 Hanson 的康斯坦思湖环流模式⁽¹⁶⁾; 多层模式中水体被分成若干层次, 在每一层对方程积分, 将三维问题化为若干个二维问题进行求解, 如 Simons 的大湖模式⁽⁵⁾。这类模式几乎被用于所有环流计算中, 是应用最为广泛的模式。众所周知, 典型的湖泊密度层结一般将水体分为湖上层、湖中层(温跃层)和湖下层。因此, 湖泊中使用二层或三层模式即可, 层次过多时, 分层不易掌握, 层与层间的边界条件难以确定。

现简单介绍常用的多层湖泊动力模式⁽⁷⁾。其方程组如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huu)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + (uw)_{k-\frac{1}{2}} - (uw)_{k+\frac{1}{2}} - fhv + \frac{h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{1}{\rho} \tau^{xz}\right)_{k+\frac{1}{2}} \\ - \left(\frac{1}{\rho} \tau^{xz}\right)_{k-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial [hA_x (\frac{\partial u}{\partial x})]}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial [hA_y (\frac{\partial u}{\partial y})]}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hvu)}{\partial x} + \frac{\partial(hvv)}{\partial y} + (vw)_{k-\frac{1}{2}} - (vw)_{k+\frac{1}{2}} + fhu + \frac{h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{1}{\rho} \tau^{yz}\right)_{k+\frac{1}{2}} \\ - \left(\frac{1}{\rho} \tau^{yz}\right)_{k-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial [hA_x (\frac{\partial v}{\partial x})]}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial [hA_y (\frac{\partial v}{\partial y})]}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} + (Wc)_{k-\frac{1}{2}} - (Wc)_{k+\frac{1}{2}} - \frac{\partial [hD_x (\frac{\partial c}{\partial x})]}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial [hD_y (\frac{\partial c}{\partial y})]}{\partial y} + (D_z \frac{\partial c}{\partial z})_{k+\frac{1}{2}} - (D_z \frac{\partial c}{\partial z})_{k-\frac{1}{2}} + (S-D)h = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_{l=1}^{l=b} [\frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y}]_l = 0 \quad (4)$$

$$w_{k-\frac{1}{2}} = - \sum_{l=k}^{l=b} [\frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y}]_l \quad (5)$$

$$(\rho - \rho_0) / \rho_0 = -6.8 \times 10^{-6} (\bar{T} - 4^0)^2 \quad \bar{T}: ^\circ\text{C} \quad (6)$$

方程 (1) - (3) 是任一层 k ($k=1, 2, 3, \dots, b$, b 为总层数) 的微分方程; (1) - (2) 为动量方程; (3) 是保守量 (浓度 c) 如温度 T 、污染物浓度 c 或盐度 S 等的传输方程, 对非保守的有机物, 方程 (3) 还应加一项 $-\kappa c$, κ 为有机物的分解速率系数。方程组中, u 、 v 、 w 为 x 、 y 、 z 方向上的平均速度分量, t 时间, ζ 水位, P 压力, ρ 为平均密度, ρ_0 为温度 4°C 时的水的密度, A_x 、 A_y 、 D_x 、 D_y 为水平方向上的扩散系数。 h 为此层的厚度, 在最底层它随底地形而变。 τ^{xz} 、 τ^{yz} 为层与层间的切应力, 与上下层速度差的平方成正比, $k=1$ 时, 是湖面风应力, 设风速 W_a , 风向 ψ , ρ_a 空气密度, λ 风应力系数, 则:

$$\begin{aligned} \tau^{xz}|_{k=1} &= \lambda \rho_a W_a^2 \sin \psi \\ \tau^{yz}|_{k=1} &= \lambda \rho_a W_a^2 \cos \psi \end{aligned} \quad (7)$$

$k=b$ 时为湖底摩擦阻应力, 与底层流速和湖底粗糙率有关。

数值计算方法主要分成有限元法 (FEM) 和有限差分法 (FDM) 两大类。有限元法剖分灵活, 能适应复杂的湖岸地形, 但求解复杂, 不易实现。有限差分求解直观迅速, 但对复杂地形适应性差。研究者们致力改进了有限差分法并在此基础上提出新的计算方法。发展的裂开算子法、不规则网格有限差分法、有限分析法等⁽¹¹⁻¹³⁾。克服了传统有限差分法的不足之处, 使之成为当今主要的数值计算方法。如 Murthy 等⁽¹⁰⁾ 为了模拟安大略湖尼亚加拉河河口羽状扩散的动力和传输, 设计了一种嵌套网格系统或称之为多重嵌套网格系统。它由粗、中、细三种网格组成。粗网格格距 5km , 用于整个安大略湖; 中网格格距 1km , 用于河口附近 $15 \times 15\text{km}^2$ 的区域; 细网格格距仅 0.2km , 用于 $3 \times 2\text{km}^2$ 的河口。垂直方向分的层次在细网格中也随研究对象的不同而异。这种系统较好地处理了大小尺度的协调, 节约了大量计算时间, 具有很大的应用性。王谦谦^①在太湖大浦河口流场和风涌增减水模拟计算中也作了类似的探讨。

三、数值模拟在湖泊学研究中的应用

数值模拟在湖泊学研究中的地位、作用及应用如图 1 所示。现就其应用作一全面评述。

①中日太湖、琵琶湖合作研究科学讨论会文集, 1987, 南京。

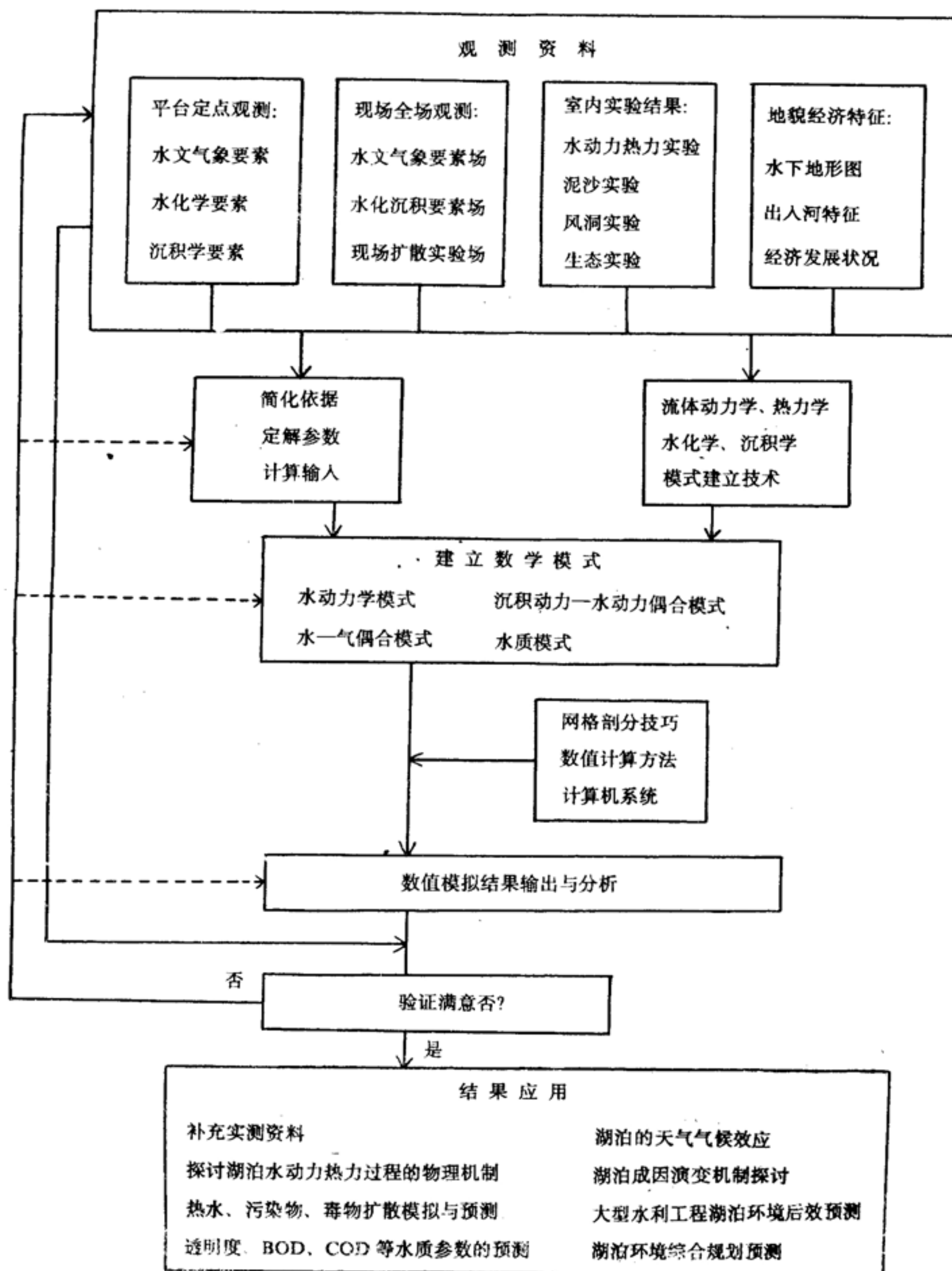


图1 湖泊数值模式的建立和结果应用

Fig. 1 Construction and application of numerical models of lakes

1. 水动力热力过程的模拟及机制探讨

湖泊水动力热力过程包括湖流、风涌水、定振波、内波和温跃层等。数值计算可模拟湖泊的风生环流（包括吞吐流）大小和流型、流的垂直切变及热学状况^{〔7、15〕}；模拟定振波的周期、振幅和衰减及风涌增减水大小^①；且可用来探讨流与热力、流场与定振波等的相互作用。这部分工作较成熟，今后除继续完善模式外，主要方向将是把已有模式应用于缺乏观测资料但又需掌握其水动力热力特点的湖泊，如干旱地区的湖泊。湖泊热学状况及内波的数值研究仍需加强。对一些较特殊的现象，如大湖中的热岛（又称生物岛）的机制可作进一步的数值探讨。

数值模拟还可用于指导实测方案的制定，使观测更为有效。模拟结果还可补充实测资料，使得实测结果在时间上延续、空间上拓宽。其预测功能更是实测无法取代的。

2. 扩散研究中的应用

扩散过程是湖泊中最为重要的过程之一，包括热水扩散、污染物（含有毒物质）和营养物质的扩散和泥沙扩散等。对这一课题的研究有着十分重要的应用价值。只有将大量现场观测和实验结果与数值模拟结果有机地结合起来，才能很好地解决这一复杂的课题。

热水扩散的数学模型研究可为电站的选址、排水取水口设计方案的决策提供部分科学依据。已有的工作有秦山核电站冷却废水及热量稀释计算、辽西电厂温排水热扩散二维数学模型研究以及安大略湖的工作等。研究的方法是流场与温度场计算相耦合。使用多层模式已可计算三维流场。至于三维温度场的计算，鉴于计算机设施、计算技术等方面的限制，目前国内外鲜有人为。好在电站排出的热水因温度较高、密度较小，主要集中在上层，或在自然湖泊中，且由于热扩散的水域一般在近岸带，垂直混合充分，因此，一层温度的二维计算基本可满足实际问题的需要。热水扩散计算的运动方程中如何实现因水量补给或流失引起的流场变化及如何给出水面综合散热系数是二个难点。湖泊热水面散热系数可参考濮培民等^{〔17〕}工作。

另一个与水动力相耦合的污染物浓度场的计算对于污水排放标准的制定、水质规划等有着重要的指导意义。计算成功与否关键取决于扩散系数选得是否合理。为此，人们做了大量现场扩散试验和理论分析工作。Lam 等^{〔9〕}在安大略湖进行了有毒物质和染色体扩散试验，用拉格朗日和欧拉法计算扩散系数，提出近岸带传输模拟的欧拉方法。在太湖大浦河口、小梅河口及日本 川河口等地，中日两国的研究人员用漂流扩散试验确定了水平扩散系数^{〔8〕}，用悬沙浓度资料确定了泥沙垂直扩散系数。

此外，还有富营养化水质模型等方面的应用，本文就不详细介绍了。

3. 湖泊透明度、BOD、COD 等水质参数预测中的应用

水体透明度（或浊度）、BOD、COD 等水质参数直接关系到周围城市饮用水质量和旅游事业，对它的预测在许多国家都很受重视。如日本琵琶湖研究所的熊谷道夫等人就致力于这项研究。透明度是最敏感最重要的水质参数，预测方法是水动力模式和悬移质传输模式联立求解。琵琶湖、太湖的透明度预测模式框图如图 2 所示。悬移质（主要是泥沙）传输模式方程是：

①吴坚，滇池风生湖流、定振波和风涌增减水的数值研究。中国科学院南京地理与湖泊研究所，1987。

$$\frac{\partial [SS]}{\partial t} + u \frac{\partial [SS]}{\partial x} + v \frac{\partial [SS]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial [SS]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial [SS]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial [SS]}{\partial z}) + w_r \frac{\partial [SS]}{\partial z} + \text{源汇项} \quad (8)$$

其中, $[SS]$ 为悬移质浓度, w_r 为泥沙沉降速率。 K_x 、 K_y 、 K_z 为扩散系数, 其中垂直扩散系数 K_z 可由波浪和流速垂直切变求得⁽²²⁾。 $\frac{\partial [SS]}{\partial t} = 0$ 为稳态 (一维) 模式, $\frac{\partial [SS]}{\partial t} \neq 0$ 为非恒定的二维或三维模式。模式中上边界条件比较容易给出, 即 $K_z = \frac{\partial [SS]}{\partial z} \big|_{z=h} = 0$, h 为水深。但下边界条件较难给定, 一般给出的是离湖底某一高度 a 上的悬沙浓度:

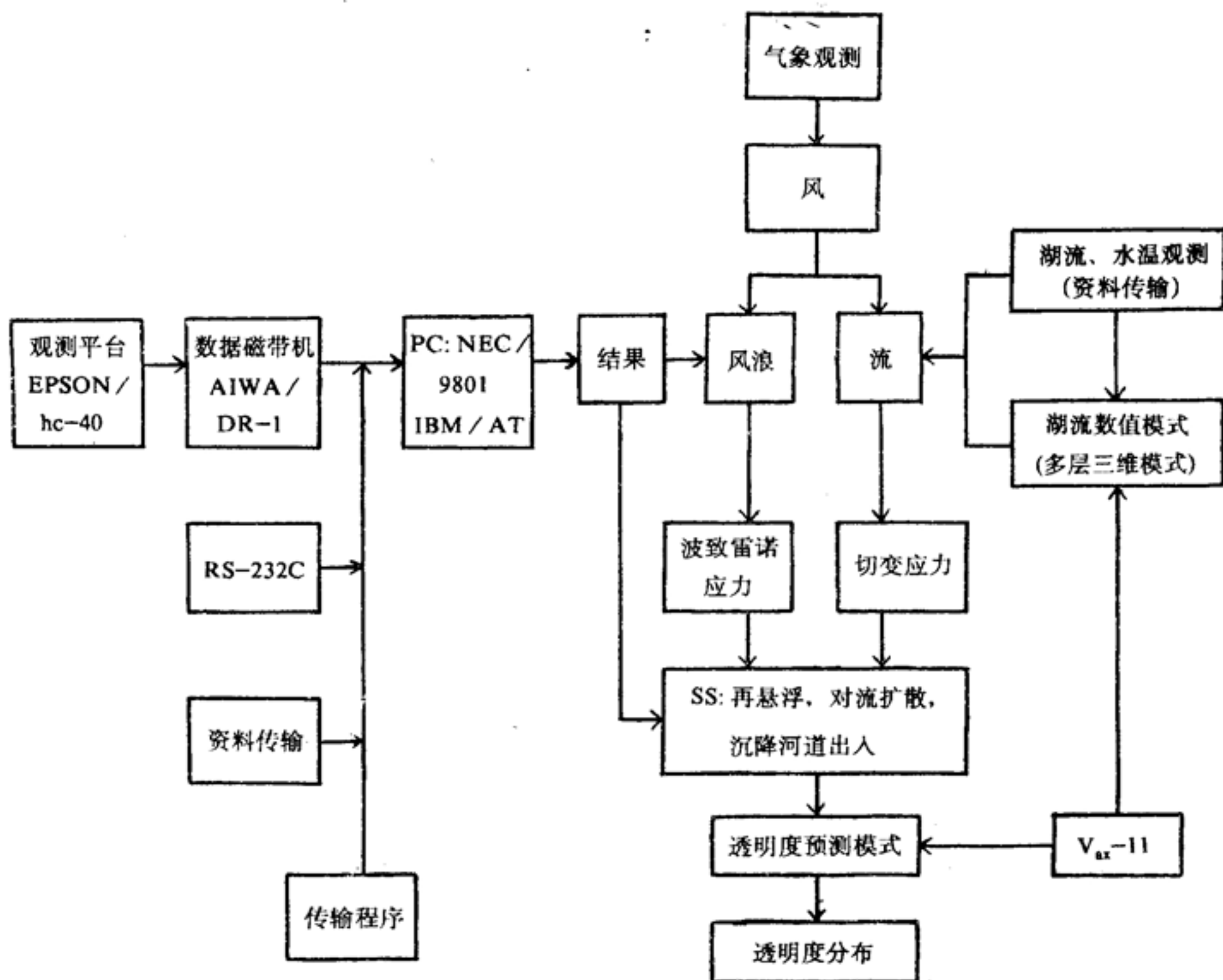


图 2 透明度预测模式系统 (琵琶湖、太湖)

Fig. 2 Model of transparency forecasting

$$[SS]_{z=0} = [SS]_a = \frac{[SS]_{\text{底}}}{1 + \frac{1}{v \tau_c}} \quad (9)$$

其中,

$$[SS]_{\text{底}} = d \rho_M (\Phi) \beta \times 10^6 \text{ (ppm)} \quad (10)$$

$$\tau_c = C' \rho_M (\beta d^2) \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (11)$$

τ_c 为临界起动应力, d : 粒径, β : 空隙度 (14–22), ρ_M : 颗粒密度, C' : 常数, $\frac{du}{dz}$: 速度 u 随离沉积底床距离 z 的变化。

目前, 已完成的工作主要是定点预测, 即由平台波浪、流、温及悬移质 (泥沙) 等观测, 求得垂直扩散系数后用一维模式预测浊度 (或透明度)⁽²⁰⁾。按图 2 进行的工作正在努力, 不久可初步解决。

4. 湖泊现代沉积动力学中的应用

泥沙的冲淤影响着湖泊 (或水库) 的演变。河口三角洲的发育与消亡紧密地与水动力条件相联系。我所分别根据实测资料⁽²¹⁾和数值模拟结果定性地揭示了浅水太湖西岸园孤状的湖岸与风生湖流之间密切的相互作用和影响。为了探讨浅水湖泊水动力条件对湖盆发展的作用, 用数值方法研究泥沙再悬浮与输移是一条极有效的途径。这一探索性课题研究思路与上述提及的透明度预测系统相仿。只是给出的地形边界条件更为复杂, 还应结合沉积动力学来分析结果。

5. 湖泊对天气、气候影响研究中的应用

湖泊冬季偏暖的小气候特点已为人们所认识。观测发现, 水域热力、动力传输对其周围大气中的中小尺度天气系统的发生发展和消亡有很大的影响。以观测事实为依据的水—气动力热力耦合模式能使我们在原由的定性半定量描述和相应的理论解释的基础上, 进一步定量地研究和预测湖泊对天气系统和气候的影响。黄纯朴 (1987) 从二维非线性热力动力方程组出发, 探讨了水—陆粗糙度和温度差异及周期性日变化引起的边界层内的风速、温度、垂直速度等主要要素场的演变和调整, 并用实测资料验证了模式。但在这一研究领域里, 真正用于自然湖泊的研究仍是空白。

四、结 语

综上所述, 数值模拟在物理湖泊 (或水库) 学的研究中有着广泛的应用。当前, 现场观测、室内实验和数值模拟方法相结合, 水动力学与大气动力学、现代沉积动力学、生态环境动力学等相结合是物理湖泊学发展的方向, 也只有这两种结合才能更有效地解决目前湖泊学研究中面临的复杂课题。我国长江三峡工程对长江中下游地区湖泊 (与水库) 环境影响的后效预测, 水质规划预测及湖泊环境容量, 干旱地区资源开发与保护等一系列课题必将促进我国湖泊数值模拟方法的进一步发展。

参 考 文 献

- (1) Liggett, J.A., Unsteady circulation in shallow homogeneous lakes. J. Hydraul. Div. ASCE. 95 1273–1288, 1969.
- (2) Cheng, R.T. and Tung, C., Wind driven lake circulation by the FEM. Proc. 13th Conference Great Lakes, 1970.
- (3) Lee, K.K., J.A. Liggett, Computation for circulation in stratified lakes. J. Hydraul. Div. ASCE. 96

- 2089-2115, 1970.
- (4) Imasato, N., Study of seiche in Lake Biwa-ko(2)— On a numerical experiment by nonlinear two-dimensional model. Contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ., 11: 77-90, 1971.
- (5) Simons, T. J. , Development of three-dimensional numerical model of the Great Lakes . Can . Inland Water Branch, Sci. Ser. 12: 269, 1973.
- (6) Walter H. Graf and Clifford H. Mortimer, Hydrodynamics of Lakes: Developments in Water Sciences 11, 1979.
- (7) Simons, T.J. Calculation models of lakes and inland seas. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci., 1980.
- (8) Syuiti Mori, An Introduction to Limnology of Lake Biwa. Kyoyo, 1980.
- (9) Lam, D.C L., Murth, C.R. and R.B. Simons, Effluent transport and diffusion models for the coastal zone, Lecture Notes Series on Coastal and Estuarine Studies, 5 Springer-Verlag, New York. 1984.
- (10) Murth, C.R. , T.J. Simons and D.C.L. Lam, Dynamic and transport modelling of the Niagara River Plume in Lake Ontario. Explor. Mar, 186: 150-164. 1986.
- (11) Thacker, W.C., Irregular grid finite difference techniques: simulations of oscillations in shallow circular basins. J. Physical Oceanography. 7(2), 1977.
- (12) 陈景仁 (美), 《恒定和非恒定传热问题的有限分析法》, ASME, 传热分册, 1982.
- (13) 何少苓、林秉南, 破开算子法在二维潮流中的应用, 《海洋学报》, 6(2), 1984.
- (14) 吴坚、大西行雄、熊谷道夫, 太湖、琵琶湖南湖的一个多层水动力学数值模式, 《海洋湖沼通报》, No.2, 1988.
- (15) Donald R.F., Hydrothermal analysis of lakes and reservoirs. Proc. of the ASCE. J. of the H.D., 1982.
- (16) Hutter, K., Hydrodynamics of Lakes. International Center for Mechanical Sciences. CISM Courses and Lectures No. 286. Springer-Verlag Wien New Your. 1983.
- (17) 濮培民等, 晋阳湖水面散热系数公式的初步探讨, 第二次中国海洋湖沼科学会议论文集, 84-93, 科学出版社, 1983.
- (18) 顾丁锡, 太湖小梅口湖区溶解氧水质模型的初步研究, 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 第3号, 科学出版社, 1985.
- (19) Smith, J.D., and S.R. Mclean, Bottom Turbulence. Elsevier, New York, 1977.
- (20) Michio Kumagai, Yukio Oonishi and Wu Jian, Predictive model for resuspension and deposition of bottom sediment. ISTB'87 International Symposium on Lake Tai and Lake Biwa., 1987.
- (21) 孙顺才、伍贻范、董木凤, 太湖地形及现代沉积, 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 第4号, 科学出版社, 1987.

APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION TECHNIQUE TO LIMNOLOGY

Wu Jian

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Academia Sinica, 210008)