

# 珊瑚岛礁淡水透镜体的数值模拟

周从直<sup>1</sup>, 方振东<sup>1</sup>, 梁恒国<sup>1</sup>, 赵广建<sup>1</sup>, 陈灌春<sup>1</sup>, 侯正昌<sup>2</sup>, 李决龙<sup>2</sup>

(1. 后勤工程学院 建筑与环境工程系, 重庆 400041; 2. 海后营房部, 北京 100842)

**摘要:** 论述了珊瑚岛礁地下淡水资源—淡水透镜体的形成、特征和影响因素。用质量守恒, Darcy 定律和 Ghyben-Herzberg 关系导出了淡水透镜体的数学模型, 用有限差分法计算了西沙永兴岛淡水透镜体的包络面, 与实测值比较误差在 3%~15% 之间。为科学开发西沙地下淡水资源提供了可靠的数学工具。

**关键词:** 珊瑚岛礁; 淡水透镜体; 数值模拟

中图分类号: P737. 2; P741. 1 文献标识码: A 文章编号: 1000- 3096(2004) 11- 0077- 04

珊瑚岛礁是由珊瑚和其它造礁生物在长期地质年代中营造而成的海底隆起构造, 集中分布在热带海域和有暖流经过的洋面, 雨量充沛, 以中国西沙永兴岛为例, 1989~1997 年, 年均降雨量为 1 595 mm。由于特殊的珊瑚地质条件, 珊瑚岛上没有可供饮用的地表淡水, 仅有雨水通过地面碎屑、砂砾渗入地下形成的淡水水体。珊瑚岛的地下淡水, 其存在形态为中央厚, 边缘薄, 宛如一枚透镜, 故称淡水透镜体, 是珊瑚岛上十分重要的淡水资源, 它的开发应用具有重大的经济、军事和社会效益。但是, 淡水透镜体十分脆弱, 过大的开采量和开采强度均可导致淡水透镜体破坏。正确确定开采量和开采强度是持续、安全开发应用淡水透镜体的前提, 基础是淡水透镜体的数值模拟。

## 1 透镜体的形成、特征和影响因素

珊瑚岛礁淡水透镜体的形成与岛屿的地质构造有关。通常, 珊瑚岛礁的下面是第三纪或更新纪的溶蚀灰岩, 孔隙、溶洞极为发育, 渗透性强, 海水容易流通, 不能形成淡水透镜体; 而上面灰岩, 成岩年代晚, 其孔隙、溶洞发育不充分, 渗透性差, 海水不易渗入, 雨水却容易保留, 能够形成淡水透镜体。尤其是年代晚, 没有次生孔隙发育, 未固结的沙砾沉积层中, 地下水流为粒间孔隙流, 有广泛的淡水透镜体。

淡水透镜体的底部通过孔隙溶洞与海水相通, 形成一个过渡带。透镜体的含盐量一般限制在氯离子浓

度 600 mg/L 之内。这一浓度边界也常被视作淡水透镜体的几何边界。淡水透镜体的密度小于海水密度, 悬浮于海水之上, 且上表面高出海平面。设透镜体在海平面上厚度为  $h_f$ , 对应的海平面以下厚度为  $h_s$ ,

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = ah_f \quad (1)$$

由静水压强基本公式, 可导出:

式中,  $\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$  分别为淡水和海水的密度, 单位为 kg/m<sup>3</sup>,

称为 Ghyben-Herzberg 比率, 如取海水密度的平均值, 淡水密度  $\rho_s = 1\,000\text{ kg/m}^3$ , 则  $a = 40$ , 即透镜体在海平面以下深度是海平面上厚度的 40 倍, 但与实测结果比较,  $a$  的值在 25 至 40 之间, 且保持相对稳定。

淡水透镜体的厚度因岛而异, 有的仅几米, 有的十几米, 已发现最厚的淡水透镜体是美国夏威夷瓦胡岛的淡水透镜体, 厚度达 304.8 m, 而有的岛屿淡水透镜体则很薄, 薄到不能维持其自然损耗, 只有雨季存在, 旱季就消失<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2004- 04- 29; 修回日期: 2004- 07- 29

基金项目: 总后勤部基金项目(总后[1998]后司字第 86 号)

作者简介: 周从直(1940- ), 男, 四川洪雅人, 教授, 主要从事水处理理论与技术、水污染控制理论及技术研究。电话: 023- 68599854, E-mail: zhi4012@163.com

影响淡水透镜体的因素很多,主要有:(1)水文地质特征:主要是渗透率的分布,裂缝、孔隙和岩溶洞的发育状况以及不整合深度。裂隙、溶洞决定了透镜体的外形。不整合面深度往往是淡水透镜体厚度的主要控制特征。(2)岛屿的大小:岛屿小,承接的雨水少,生成淡水透镜体的地质空间小,淡水透镜体就小。对印度洋中 South Keeling 环礁的勘察表明:存在淡水透镜体的最小宽度是 270 m,岛屿宽度小于这一值,降水很快流入海洋,不能形成淡水透镜体<sup>[1]</sup>。(3)地下水的回补:地下水的回补主要取决于雨量、植被总量和性质,土壤性质。(4)潮汐:每天海水有两次潮汐,变化范围大约 0.2 m,每季度为 0.4 m,由于淡水透镜体悬浮于海水之上,通过孔隙,溶洞与海水相通,因此潮汐会引起透镜体整体的涨落,但对透镜体的包络面几乎不产生影响。

## 2 淡水透镜体的数值模拟

### 2.1 数学模型

降雨、渗透和抽取均会使淡水透镜体中淡水流动,引起水量、水头分布和淡水透镜体界面的改变。充分了解透镜体对淡水流动过程的动力学响应,才能制定正确的淡水开采量和抽水速率。数学模型是反映这种动力学响应的有力工具。

假设潮汐引起透镜体上下运动而不影响其内部的动力学性质,且流动为层流,符合 Darcy 定律,应用 Ghyben-Herzberg 关系和质量守恒关系可导出淡水透镜体的数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{R}{a+1} = 0 \quad (2)$$

式中:  $h$  为透镜表面在海平面以上的厚度,为方便书写计,式中已用  $h$  代替了  $h_f$ , 单位为 m;  $k_x$ ,  $k_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的渗透系数,单位为 m/s;  $R$  为单位面的净回补率,单位为 m/s;  $S$  为给水度,可取为孔隙率  $n$ ,无量纲。

若透镜体所处含水层均质,各向同性,则  $k_x = k_y = k$ 。

方程(2)可进一步简化:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + \frac{2R}{k(a+1)} = \frac{2s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

方程(3)是一个非线性的二阶偏微分方程,为了获得唯一解,需要在求解域内给出适当的定解条件即初始条件和边界条件。由于淡水透镜体的形成和发展实际上是一个漫长的历史过程,因此初始条件可以任意选取,只要不违背物理事实。通常在地下渗流的求解中,可提出两类边界条件:第一类是定水头边界条件,即在边界上给定淡水水头的值,当淡水层与海洋相通时,边界上的地表水位(零水头)可作为第一类边界条件;第二类是定流量边界条件,即在边界上给定流量,当边界为不透水层时,边界上的零流量可作为第二类边界条件。

### 2.2 西沙永兴岛淡水透镜体的数值模拟

永兴岛是西沙群岛的主岛,位于广西湛江东南方向 180 n mile 处,该岛近似为椭圆,东西长 2 km,南北宽 1.4 km,面积 1.8 km<sup>2</sup>,根据永兴岛所处的海洋环境和地质结构,取:

$$\left. \begin{array}{l} \text{初始条件: } h(x, y) = 0.01, x, y \in \text{区域内 } t = 0 \\ \text{边界条件: } h(x, y, t) = 0.0, x, y \in \text{边界上 } t \geq 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

Ghyben-Herzberg 比率:  $a = 30$ , 孔隙率:  $n = 0.2$ , 渗透系数:  $k = 50 \text{ m/d}$ 。

方程(3)和定解条件(4)构成了永兴岛淡水透镜体的数学模型。用有限差分法求解,取时间和空间步长为:

$$\Delta t = 1 \text{ d}, \Delta x = \Delta y = 100 \text{ m}$$

永兴岛外形计算网格见图 1。

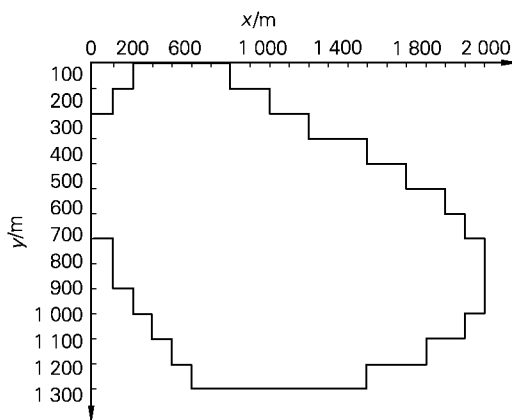


图 1 永兴岛外形及计算网格

Fig. 1 Finite difference grid representing Yongxing Island

通过数值求解, 获得了永兴岛淡水透镜体的淡水水头分布。计算结果见表 1 和图 2、图 3。

表 1 永兴岛地下水位的计算值与实测值

Tab. 1 Simulation and observation of the water table in Yongxing Island

| 井号 | $h_s$ 计算值<br>(m) | $h_s$ 实测值<br>(m) | 相对误差<br>(%) |
|----|------------------|------------------|-------------|
| 1# | 15.17            | 14.70            | - 3.2       |
| 2# | 16.13            | 17.40            | 7.3         |
| 3# | 15.83            | 17.10            | 7.4         |
| 4# | 13.49            | 14.40            | 6.3         |
| 5# | 16.37            | 17.40            | 5.7         |
| 6# | 16.73            | 18.00            | 7.1         |
| 7# | 12.26            | 12.60            | 2.4         |
| 8# | 15.20            | 17.20            | 11.6        |

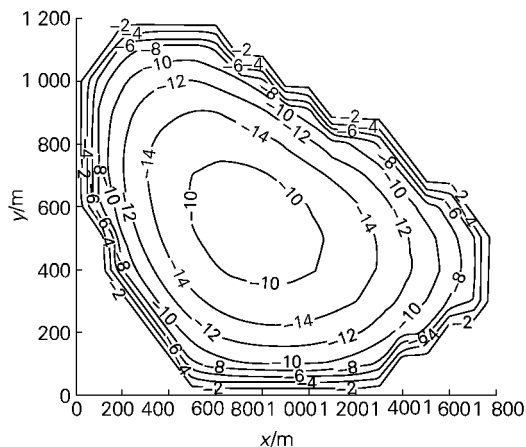


图 2 淡水透镜体等深图

Fig. 2 Map showing the depths of the freshwater lens of Yongxing Island

图中的实测值是指对现存永兴岛水井中 8 口井的水表面距地表的距离, 以及地表海拔高程的测量值求得的淡水透镜体在海平面以上的高程  $h_f$  和由此推得的淡水界面在海平面以下的深度  $h_s = ah_f$ 。

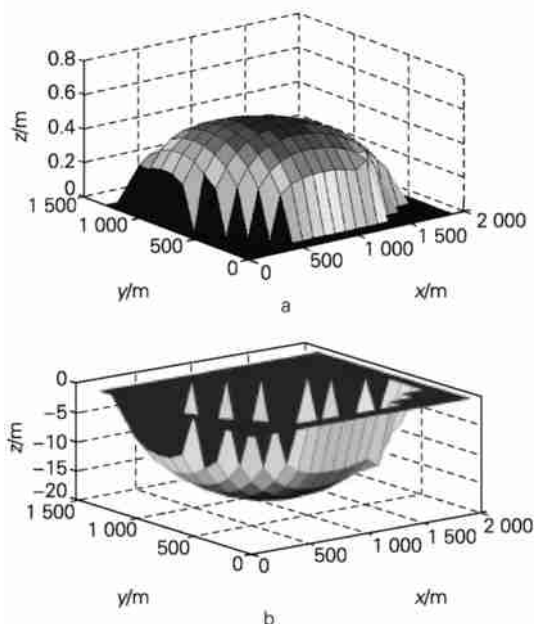


图 3 淡水透镜体三维视图

Fig. 3 Three dimensional view of the freshwater lens

a: 海平面以上部分; b: 海平面以下部分

a: portion above the sea level; b: portion under the sea level

## 2.3 讨论

表 1 给出了淡水透镜体在海平面以下的计算界面值和实测值。计算值和实测值十分接近。误差在 3%~15% 之间。大部分点的计算误差在 10% 以内。这表明淡水透镜体的数学模型能较好地反映透镜体的动力学特性。图 2 是透镜体的等深线, 和岛的平面外形十分相似。图 3 是透镜体海平面以上的三维视图。

计算中的边界条件取为零水头具有合理性; 计算中选用的  $k$ ,  $n$  值根据永兴岛土壤平均粒径由经验数据获得<sup>[2]</sup>, 计算结果可靠。

## 3 结论

(1) 基于质量守恒和 Darcy 定律建立起来的淡水透镜体数学模型, 能较好地模拟透镜体的动力学过程和计算淡-海水界面, 与实测值比较, 误差在 3%~15% 之间。(2) 永兴岛淡水透镜体外形的求得, 对于制定永兴岛淡水透镜体的开采量和强度具有重要的指导意义。

参考文献:

congress[ C] . Australian: Adelaide, 1994. 417-

[ 1] Falkland A C. Management of freshwater lenses on 422

small coral islands[ A] . Water Down Under 94

[ 2] 周善生. 水力学[ M]. 北京: 高等教育出版社, 1980.  
399- 400.

## Numerical simulation of freshwater lens on coral island

ZHOU Cong- zhi<sup>1</sup>, FANG Zhen- dong<sup>1</sup>, LIANG Heng- guo<sup>1</sup>, ZHAO Guang- jian<sup>1</sup>, CHEN Guan- chun<sup>1</sup>, HOU Zheng- chang<sup>2</sup>, LI Jue- long<sup>2</sup>

(1. Department of Architectural and Environmental Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Logistic Department of the Navy, Beijing 100842, China, )

Receive: Apr., 29, 2004

**Key words:** coral island; freshwater lens; numerical model

**Abstract:** Freshwater lens is the water resource under ground on a coral island. Its formation, characteristics and influence factors were discussed. Based on the Ghyben-Herzberg approximation and Dupuit assumption, a two dimensional numerical model was developed to simulate the lens configuration of Yongxing island of Xisha islands under unsteady condition. Results from application of the model were in very good agreement with field observations, and error was between 3% and 15%. A reliable math tool was provided to develop the freshwater resources on the coral island scientifically.

( 本文编辑: 刘珊珊)