

雨量变化对珊瑚岛礁淡水透镜体的影响

周从直, 方振东, 梁恒国, 王浩, 敖澹
(后勤工程学院 营房管理与环境工程系, 重庆 400016)

摘要: 为探索雨量变化对珊瑚岛礁淡水透镜体的影响, 应用质量守恒、Darcy 定律和 Ghyben-Herzberg 比率, 推导了珊瑚岛礁淡水透镜体的数学模型。根据西沙地区 1989 年—1998 年 10 年的月均降雨量及最高、最低年降雨量, 用有限差分法计算了永兴岛淡水透镜体的外形和贮水量的变化。结果表明, 永兴岛淡水贮量 4 月最小, 10 月最大, 相差值为 4 月贮水量的 10.5%, 而 10 年间降雨量最大和最小年淡水透镜体贮量与平水年相比, 分别多 16.8% 和少 7.2%, 这一结果可用于制定淡水透镜体的开采战略, 实现淡水资源的安全、科学、持续开发利用。

关键词: 珊瑚岛礁; 淡水透镜体; 数值模拟

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2006)01-0053-05

Influence of Rainfall on Freshwater Lens in a Coral Island

ZHOU Cong-zhi FANG Zhen-dong LIANG Heng-guo WANG Haq AO Lu

(Department of Military Real Estate Management and Environmental Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 400016, China)

Abstract Mathematical model of freshwater lens in coral island was deduced by conservation of mass, Darcy's law and the Ghyben-Herzberg approximation to explore the influence of rainfall on a freshwater lens in a coral island. Based on the average monthly rainfall, the maximum and the minimum annual rainfall from 1989 to 1998, the shape and pondage of freshwater lens of Yongxing Island were calculated by a finite difference method. Calculation results show that the pondage is minimum in April and maximum in October and the difference of the two months is 10.5% of that in April. During the 10 years, the pondage of the maximum and minimum rainfall year is 16.8% more and 7.2% less than the normal. The exploitation strategy of the freshwater lens is able to be constituted by means of the results so that the freshwater resource can be used safely, scientifically and sustainably.

Key words coral island; freshwater lens; numerical modeling

珊瑚岛礁淡水透镜体是珊瑚礁岛上可再生的有限地下淡水资源, 其上为一潜水面, 埋深不大, 底部通过珊瑚灰岩的孔隙溶洞与海水相通, 形成一个较薄的过渡带。研究淡水透镜体的动态特性时, 常把这一过渡带简化为淡水-盐水的突变界面。界面随降雨、抽水、流失而变化。降雨时透镜体得到回补, 厚度增大, 贮量增加; 抽水和流失时厚度减小, 贮量减少。特别是当用井抽取淡水时, 井中的水位降深会引起井下方淡水-盐水界面局部上升, 形成倒锥,

如果抽水强度过大、抽水时间过长, 倒锥可能击穿透镜体, 海水上升至潜水面, 使透镜体分裂, 淡水贮量大大下降, 并使地表植被枯死, 引发岛屿的生态环境问题。因此, 开发利用珊瑚岛礁淡水透镜体需要制定正确的开采战略, 确定合理的抽水速率和开采量。构建淡水透镜体的数学模型, 模拟降水对淡水透镜体外形和贮量的影响是制定正确的开采战略, 实现淡水透镜体安全、科学、持续开发利用的基础性工作。

1 淡水透镜体的数学模拟

1.1 主管方程

淡水透镜体生成于珊瑚和其他造礁生物的碎屑沙砾沉积层中,地下水属多孔介质粒间孔隙流。假设含水层均质且各向同性,孔隙流为不可压层流,符合 Darcy 定律。在淡水透镜体所在的多孔介质中取一微元,上表面为潜水面,下表面为淡水-盐水面。底边长分别为 dx 、 dy ,高为 $h = h_f + h_s$ (h_f 和 h_s 分别为淡水透镜体在海平面上、下的厚度),如图 1 所示。

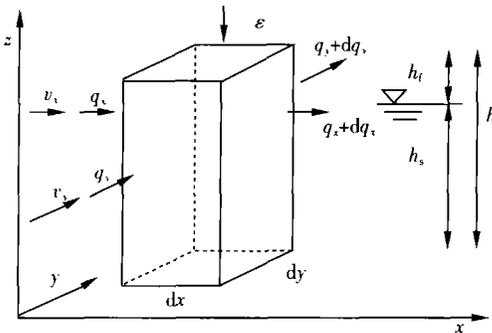


图 1 淡水透镜体微元示意图

Fig 1 Sketch of freshwater lens element

设降水、蒸发对透镜体形成的补给为 $\varepsilon [L^3 / (TL^2)]$,流入为正,输出为负; dt 时段内 x 、 y 方向上流入的体积流量分别为 q_x 、 q_y ,流出为 $q_x + dq_x$ 、 $q_y + dq_y$ (L^3 / T),给定 x 、 y 方向上流速为 v_x 、 v_y (L / T),则:

$$q_x = v_x h dy dt \tag{1}$$

$$dq_x = \frac{\partial (v_x h)}{\partial x} dx dy dt \tag{2}$$

$$q_y = v_y h dx dt \tag{3}$$

$$dq_y = \frac{\partial (v_y h)}{\partial y} dx dy dt \tag{4}$$

在 dt 时段内,通过补给作用微元获得的流体体积为 $\varepsilon dx dy dt$ 。如果流入量大于流出量,会引起 h 增大,由此增加的流体体积为 $\mu \frac{\partial h}{\partial t} dx dy dt$ 由质量守恒得到方程:

$$- dq_x - dq_y + \varepsilon dx dy dt = \mu \frac{\partial h}{\partial t} dx dy dt \tag{5}$$

将式 (1) ~ (4) 代入式 (5) 得:

$$- \frac{\partial (v_x h)}{\partial x} - \frac{\partial (v_y h)}{\partial y} + \varepsilon = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \tag{6}$$

应用 Ghyben-Herzberg 近似比率^[1],并设海平面上、下淡水透镜体厚度之比为 $1/\alpha$, 则:

$$h = (\alpha + 1) h_f \tag{7}$$

由 Darcy 定律:

$$v_x = -K \frac{\partial h_f}{\partial x} \tag{8}$$

$$v_y = -K \frac{\partial h_f}{\partial y} \tag{9}$$

将式 (7)、(8)、(9) 代入式 (6) 得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h_f \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_f \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + \frac{\varepsilon}{K(\alpha + 1)} = \frac{\mu}{K} \frac{\partial h_f}{\partial t} \tag{10}$$

为书写方便用 h 表示 h_f , 则有:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + \frac{2\varepsilon}{K(\alpha + 1)} = \frac{2\mu}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \tag{11}$$

式中 μ ——孔隙率

K ——渗透系数, L/d

α ——Ghyben-Herzberg 比率, 取值为 25~40

1.2 定解条件

边界条件

在地下渗流问题中,可提出两类边界条件,第一类边界条件是定水头边界条件,即给定边界上的水头值,当淡水层与河、湖、海洋相通时,地表水位可作为第一类边界条件;第二类边界条件为定流量边界条件,典型的第二类边界条件是不透水层边界和地下分水岭所确定的零流量边界条件。由于所研究的珊瑚礁岛孤立于海洋之中,淡水透镜体周边与海水相接,因此取第一类边界条件: $h(x, y, t) = 0$ 其中 $x, y \in$ 边界上, $t \geq 0$

初始条件

淡水透镜体是在一个漫长的地质年代中形成的处于动态平衡的地下水体,初始条件的选取没有严格限制,只要不违背物理事实即可,研究取 $h(x, y) = 0$ 其中 $x, y \in$ 求解域内, $t = 0$

2 降雨对西沙永兴岛淡水透镜体的影响

2.1 永兴岛的地质与气候环境

永兴岛位于南海中部,西北距海南省榆林港 337 km,呈椭圆形。岛屿东西长为 2 km,南北宽为 1.4 km,四周有 1.0~1.5 m 高的礁堤,岛内地势平坦,最大高程为 8.2 m。根据地质勘探资料,永兴岛基底为前寒武纪晚期花岗片麻岩,其上部为厚达 1250 m 的生物碎屑灰岩,表层 20 m 内为松散的珊瑚和其他造礁生物碎屑沉积层。永兴岛地处热带,雨量充沛,根据西沙气象台提供的资料,1989 年一

1998 年的年均降雨量为 1 499 mm, 其间最高 (丰水) 和最低 (枯水) 年降雨量分别为 2 857 mm 和 1 031 mm。10 年间月均降雨量 (平水) 和最高、最低降雨年的月均雨量见表 1。

表 1 永兴岛月均降雨量

Tab 1 Mean monthly rainfall in Yongxing Island mm

月份	平水	丰水	枯水
1	25 0	3 4	10. 2
2	11 0	1 5	4. 2
3	16 2	9 4	3. 4
4	39 3	0 0	0. 9
5	126 3	293. 2	122 0
6	174 1	12 3	228 7
7	165 8	63. 6	182 4
8	277 7	573. 4	176 6
9	334 2	1 314. 9	154 8
10	293 9	371. 9	101 4
11	72 8	179. 7	16 0
12	32 6	34. 1	30. 2

2.2 差分格式与参数确定

式 (11) 是非线性二阶偏微分方程, 采用数值求解。令 $H = h^2$ 则式 (7) 可转变为:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{\mu}{K \sqrt{H}} \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{2\varepsilon}{K(\alpha + 1)} \quad (12)$$

用有限差分法对式 (8) 进行离散处理, 并采用加权平均的差分格式, 则可得用于计算的数值方程:

$$H_{ij}^{n+1} = \frac{1}{\omega + \frac{a^2 \mu}{4K \Delta t \sqrt{H_{ij}^n}}} \left[\omega \bar{H}_{ij}^{n+1} + (1 - \omega) (\bar{H}_{ij}^n - H_{ij}^n) + \frac{H_{ij}^n}{4K \Delta t \sqrt{H_{ij}^n}} + \frac{a^2 \varepsilon_{ij}}{2K(1 + \alpha)} \right] \quad (13)$$

式中 ω ——加权系数, 当 $\omega = 0.5$ 时该差分格式即为 Crank-Nicolson 格式, 无条件稳定, 具有二阶精度^[2], 研究使用 Crank-Nicolson 格式

n ——时间层

Δt ——时间步长, $\Delta t = 0.5$ d

a ——空间步长, $a = 25$ m, $\Delta x = \Delta y = a$

μ ——孔隙率, 取 0.2

K ——渗透系数, 取 50 m/d

\bar{H}_{ij}^n —— n 时间层上和 (i, j) 相邻四节点 H 的平均值

$$\bar{H}_{ij}^n = \frac{1}{4} (H_{i+1,j}^n + H_{i-1,j}^n + H_{i,j-1}^n + H_{i,j+1}^n) \quad (14)$$

用选定的空间步长, 将永兴岛按 52×77 (行 \times 列) 格网化, 得到 2 622 个求解网格, 在此求解域内, 用 Gauss-Seide 迭代法对式 (13) 进行求解, 得到各节点处的 H_{ij} , 从而求得相应节点处淡水透镜体在海平面上、下的厚度 $h_{f,ij}$, $h_{s,ij}$ 和总贮水量 V 。

$$h_{f,ij} = \sqrt{H_{ij}} \quad (15)$$

$$h_{s,ij} = \delta h_{f,ij} \quad (16)$$

$$V = \mu \sum_i \sum_j a^2 (1 + \alpha) h_{f,ij} \quad (17)$$

计算值与实测值比较, 误差在 3% ~ 15%^[3]。

2.3 四季雨量变化对淡水透镜体的影响

由表 1 给出的永兴岛平水年的月均雨量分布, 计算一年内每月最后一天永兴岛淡水透镜体的水头分布和贮水量, 得到不同剖面的水头分布曲线和贮量的四季变化曲线。图 2、3 分别是通过水头值最大点 ($i = 29, j = 32$) 的 29 行和 32 列在 4、8、10 三个月的淡水深度曲线。

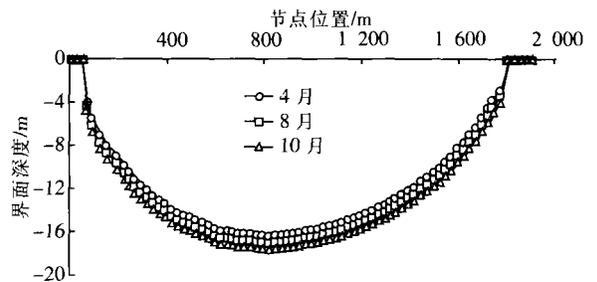


图 2 第 29 行不同月份淡水深度模拟值

Fig 2 Simulation value of fresh water depth at 29th line in different months

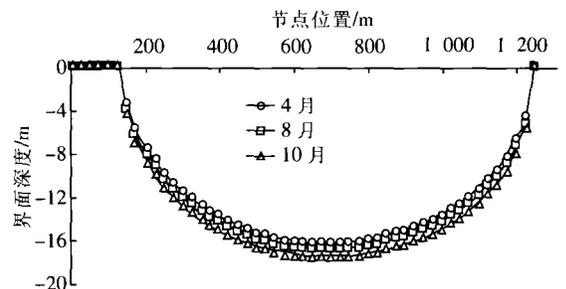


图 3 第 32 列不同月份淡水深度模拟值

Fig 3 Simulation value of fresh water depth at 32nd row in different months

由图 2、3 可见, 淡水透镜体中央厚、边缘薄, 酷似一枚透镜体, 并且 4 月水头值最小, 10 月最大, 其

余月份的水头值在两者之间。在中央最厚点处，4 月的水头模拟值为 16 m，10 月的水头模拟值为 17.2 m，相差 1.2 m (为 4 月水头值的 7.5%)。图 4 是淡水透镜体贮量的变化曲线，它以 4 月贮量 V_4 为基准，给出各月贮水量比值的变化，同时也给出了雨量变化曲线。

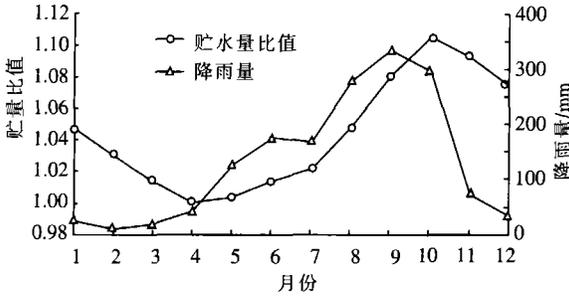


图 4 月平均降雨量和淡水透镜体体积模拟值

Fig 4 Mean monthly rainfall and simulation value of freshwater lens pondage in different months

图 4 表明：贮水量从 4 月到 10 月逐渐增加，从 10 月到次年 4 月逐月减少，大致对应了降雨量的四季变化。但年初变化趋势不尽相同，从 2 月到 4 月雨量逐月增加，而贮水量单调下降。从图 4 还可知 4 月贮水量最小，10 月最大，两者相差 10.5%。

2.4 年降雨量变化对淡水透镜体的影响

由表 1 可知，1989 年—1998 年，永兴岛年降雨量变化较大，丰水年降雨量几乎为平水年的 2 倍，而枯水年降雨量又仅为平水年的 2/3，年降雨量补给不同，淡水透镜体的水头和贮量也不相同。为考察年降雨量变化的影响，将丰水、平水、枯水的 3 年降雨量各自进行平均，得到各年内的统一补给量，由通过模拟计算得到丰水、平水和枯水年淡水透镜体的水头分布和贮水量。

图 5、6 是根据模拟计算值绘制的通过透镜体最厚点处 $i = 29$ 及 $j = 32$ 两个剖面的淡水深度分布曲线。可见，丰水年淡水透镜体的水头比平水年和枯水年大。在透镜体中央最厚点处 ($i = 29, j = 32$)，丰水年和枯水年淡水透镜体的模拟计算值分别为 18.7 m 和 15.5 m，与平水年淡水透镜体的模拟值 (16.5 m) 相比，差值分别为平水年淡水水头的 13.3% 和 6.0%。相应地，丰水年淡水透镜体的贮水量大于平水年，枯水年的则小于平水年，与平水年相比，丰水年淡水贮量多 16.8%，而枯水年则少 7.2%。

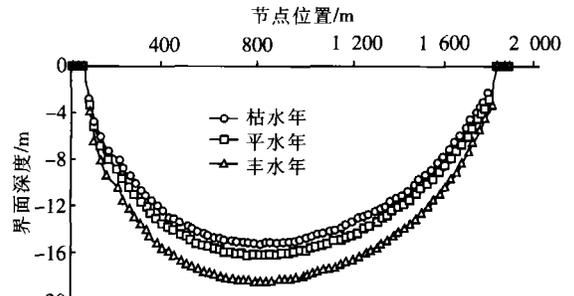


图 5 第 29 行各年淡水深度模拟值

Fig 5 Simulation value of freshwater depth at 29th line annually

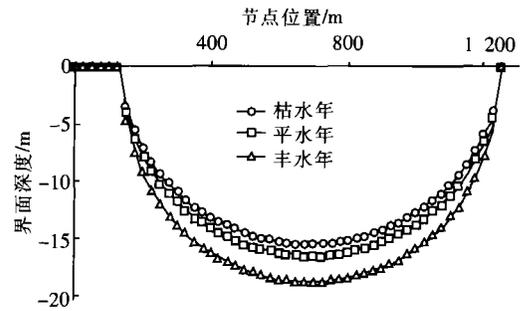


图 6 第 32 列各年淡水深度模拟值

Fig 6 Simulation value of freshwater depth at 32nd row annually

2.5 分析与讨论

珊瑚岛礁淡水透镜体中央厚、边缘薄，根据模拟计算，永兴岛淡水透镜体最大厚度为 15.5~18.7 m，在岛上凿井抽水时，宜在岛屿中部设井，避免在边缘抽水，这样即使抽水形成倒锥也不容易击穿透镜体，从而提高抽水的安全性。

淡水透镜体的存在是一个不断回补和损耗的过程。降雨时对淡水透镜体回补，会使透镜体增厚，贮量增加；损耗则会使透镜体变薄，贮量减少。损耗的主因是淡水-盐水界面处的淡水流失，其动力是淡水透镜体中央向边缘存在的水力坡度。损耗是一个持续发生的过程，回补只有在下雨时才有可能发生。当损耗大于回补时，透镜体表现出现实的贮量减少，反之贮量增加。图 4 表明，2 月—4 月虽然雨量增加，但在旱季，回补小于损耗，所以透镜体贮量仍逐月减少，只有 4 月后随着雨季来临，雨量增加，回补大于损耗，透镜体贮量才回升。因此淡水透镜体是一种不断自行损耗的可再生淡水资源，应该对其加以充分利用，否则会最终流入大海。

淡水透镜体的贮量随季节与年度降雨量的变化而变化，永兴岛淡水透镜体最大贮量出现在雨

季末的 10 月份,旱季末的 4 月份则贮量最小。在安排淡水透镜体的开采时,雨季中期至旱季初期(8 月至次年的 1 月)可多开采一些,其余时间少开采一些,如果某一年需求量大,在不严重影响透镜体原则下可加大开采量,而在次年压缩开采量,让萎缩了的透镜体恢复。具体开采量和抽水速率应结合水量平衡根据模拟计算结果制定,实现对淡水透镜体安全、科学、持续的开发利用。

3 结论

珊瑚岛礁淡水透镜体中央厚、边缘薄,厚度和淡水贮量随季节和年度降雨量变化而变化,在模拟计算期内,对平水年透镜体中央最厚点处而言,4 月的水头值最小(为 16 m)、10 月最大(为 17.2 m),两者相差 7.5%,相应的淡水贮量相差约 10.5%,枯水年和丰水年透镜体中央最厚点处水头模拟值分别为 18.7 m 和 15.5 m,与平水年相比,分别多 13.3% 和少

6.0%,对应的淡水贮量分别多 16.8% 和少 7.2%。

珊瑚岛礁淡水透镜体是不断自行损耗的可再生淡水资源,通过制定正确的开采战略可实现安全、科学、持续的开发利用。

参考文献:

- [1] Thomas R E, Chidley John W, Lloyd A. A mathematical model study of fresh-water lens [J]. Ground Water, 1997, 15(2): 215-222
- [2] 张涤明. 计算流体力学 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1991
- [3] 周从直, 方振东, 梁恒国, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体的数值模拟 [J]. 海洋科学, 2004, 28(11): 77-80

电话: (023) 68571709

E-mail: zh4012@163.com

收稿日期: 2005-09-16

(上接第 52 页)

3 结论

在水温为 25~30℃ 的条件下,渗流式生物床的自然启动约需 40 d 才能完成,而采用减少进水负荷同时投加营养物的启动方式则能有效加快渗流式生物床的启动,只需约 12 d 就可以完成。

渗流式生物床对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率高且稳定。启动完成后,在 HRT 为 8 h 时对其平均去除率为 94.4%,在 HRT 为 24 h 时平均去除率为 98.3%。可见当水力停留时间达到 8 h 后,再提高水力停留时间对提高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率的效果不明显。

渗流生物床对 COD 有一定的去除能力,但去除率随进水水质的变化而变化。启动完成后,在 HRT 为 8 h 时对其平均去除率为 51.3%,在 HRT 为 24 h 时为 53.5%,增加水力停留时间对提高 COD 去除率基本没有效果,而且出水中存在一定比例的难降解 COD。

参考文献:

- [1] Shigeo F, Chiaki N. Pilot-plant experiments for improve-

ment of polluted canal/kang water by rock-bed filtration [J]. Wat SciTech, 1997, 35(8): 83-90

- [2] Saïlan M Y, Ramadan S A, Butler D. Upgrading waste stabilization pond effluent by rock filters [J]. Wat Sci Tec, 1995, 31(12): 369-378
- [3] 董哲仁,刘蓓,曾向辉. 受污染水体的生物-生态修复技术 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(2): 1-4
- [4] 张杰,曹相生,孟雪征,等. 好气滤池 3 种挂膜方法的实验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10): 1216-1219
- [5] Bacquet G, Joret J C, Rogalka F. Biofilm start-up and control in aerated filter [J]. Environ Tech, 1991, 12: 747-756
- [6] 田文华,文湘华,钱易. 沸石滤料曝气生物滤池启动性能研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 12(3): 38-42
- [7] 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002

电话: (010) 62796952

E-mail: hennia@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-09-20