

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201909048

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

马 婧^{1,2}, 鲁春辉^{1,2}, 吴吉春³, 罗 剑⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 4. 美国佐治亚理工学院土木与环境工程系, 佐治亚州 亚特兰大 30331)

摘要: 淡水透镜体作为海岛上珍贵的地下淡水资源, 对于满足居民生活用水与维护生态系统具有重要作用, 增加海岛地下淡水资源储量可有效缓解海岛地区普遍存在的水资源短缺问题。本研究提出通过在海岛外部区域采用低渗透性介质材料增加海岛地下淡水资源储量的方法, 采用室内物理模型实验与基于变密度地下水流溶质运移模型的数值模拟相结合的方法对提出方法的有效性进行了验证, 并通过野外尺度的数学模型分析工程实施可能性。实验与数值模拟结果较吻合, 表明该方法具有抵御海水入侵、增加海岛地下淡水资源储量的巨大潜力。通过基于野外尺度的数值模拟分析工程实施的可能性, 发现对于降雨入渗补给强度为 0.005 7 m/d、长度为 200 m、孔隙度为 0.3 的狭长形均质海岛, 地下淡水储量为 66.5 m³/m, 在海岛外部区域采用渗透系数为 1 m/d、厚度为 5 m 的低渗透性介质材料后, 淡水透镜体经过约 8 a 时间可再次达到稳态, 地下淡水储量为 343.8 m³/m, 增加约 4 倍, 工程实施具备一定可能性。本研究为缓解海岛地区缺水问题、实现淡水资源可持续利用提供了一种新方法。

关键词: 海岛; 淡水透镜体; 渗透系数; 室内实验; 数值模拟

中图分类号: P641; X173

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)03-0001-07

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

MA Jing^{1,2}, LU Chunhui^{1,2}, WU Jichun³, LUO Jian⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 4. School of Civil and Environmental Engineering, Atlanta, Georgia 30331, US)

Abstract: There are many natural and artificial islands in our country, where the freshwater lens are precious freshwater resource and play an important role in supporting domestic water and the health of the groundwater-dependent ecosystems. Improving the groundwater storage of islands can effectively mitigate the widespread issues of water resources shortage of islands. This study presents some methods capable of improving oceanic fresh groundwater storage by using a low-permeability medium along the shore line. The effectiveness of the proposed method is validated through experimental and numerical studies. Field-scale numerical models are developed to analyze the possibility of the field application. The experimental fresh water-saltwater interface result is in good agreement with the numerical result, indicating that the proposed method has a great potential in preventing seawater intrusion and improving the freshwater storage. The numerical results show that for an

收稿日期: 2019-09-18; 修订日期: 2019-10-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402800); 国家自然科学基金资助项目(51679067)

第一作者: 马婧(1994-), 女, 硕士生, 研究方向为海岸带地下水。E-mail: jma@hhu.edu.cn

通讯作者: 鲁春辉(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海岸带地下水、地下水动力及溶质运移、地下多相流等研究。

E-mail: clu@hhu.edu.cn

imaginary island, the fresh groundwater storage can be increased by about 5 times after 8 years since the project is implemented. This study provides a new method for alleviating the issue of water resources shortage and realizing sustainable use of freshwater resources in island areas.

Keywords: oceanic island; fresh water lens; low K zone; laboratory experiments; numerical simulations

随着陆地上人口、资源、环境与发展之间矛盾的日益加剧以及科学技术的进步,人类未来向海洋发展成为必然。据统计,我国拥有面积达 500 m^2 以上的岛屿 6 500 多个,有人居住的海岛约 450 个^[1]。海岛是我国经济发展的重要依托,有着巨大的军事与科学价值。进入 21 世纪以来,人工岛成为目前世界用海的流行趋势。随着海岛的开发建设,相关的水资源供给问题日趋紧张,仅通过船运大陆淡水、淡化海水、收集雨水等措施难以满足日益增长的淡水需求。因此,如何提高淡水资源安全保障能力是海岛开发亟待解决的问题。

由于海岛地表结构疏松,渗透性强,通常无地表河流,地下水成为海岛重要的淡水资源,对维持岛上居民生活和生态系统具有重要意义。由于咸淡水存在的密度差异,大部分海岛的地下淡水漂浮于咸水之上,形状宛如透镜体,故被称作淡水透镜体。目前,国内外学者对淡水透镜体的研究集中在淡水透镜体的影响因素、形成与演变机理、开采方式等^[2-15]。如 Cozzolino 等^[16]基于野外监测数据对影响淡水透镜体形成发育的自然及人为因素进行了量化及讨论。Holt 等^[17]通过野外观测及数值模拟重建了 Spiekeroog 岛淡水透镜体演化过程,确定地下水盐度分布。Vincent 等^[18]通过建立 Bonriki 岛三维数学模型对地下水响应式开采进行评估。淡水透镜体极易遭受海水污染,国内外学者针对保护淡水透镜体、缓解海水入侵程度的方法提出了很多建议^[19-23]。如 Saeed 等^[24]认为采用渗水廊道取水可减少水位降深,避免含水层咸化。Herndon 等^[25]提出对地下水进行回灌补源,抬高地下水水头。Strack 等^[26]提出人工降低滨海含水层上部的渗透系数阻止海水入侵。而有关如何增加海岛地下淡水储量的方法研究,尚未见相关报道。

本文提出一种通过在海岛外部区域采用低渗透性介质材料增加海岛地下淡水储量的方法。与船运大陆淡水、淡化海水等措施相比,该方法可较稳定、经济地实现淡水的自给自足^[27]。本研究将采用物理模型实验与数值模拟相结合的方法对该方法的有效性进行验证,并利用基于野外尺度的数值模拟讨论工程实施可能性,以期对解决海岛地下淡水资源可持续利用的问题进行有益的探索。

1 概念模型

本研究基于一个理想对称型的长条形海岛,因此仅考虑海岛横截面的二维模型(图 1a)。假设均质海岛的渗透系数为 K_1 ,半长为 R 。在稳定状态下,由于降雨入渗补给以及入侵咸水的影响,淡水透镜体形成于海岛浅层。通过海岛外部长度为 R_2 的低渗透性介质层(渗透系数为 K_2)增加海岛地下水淡水储量(图 1b)。

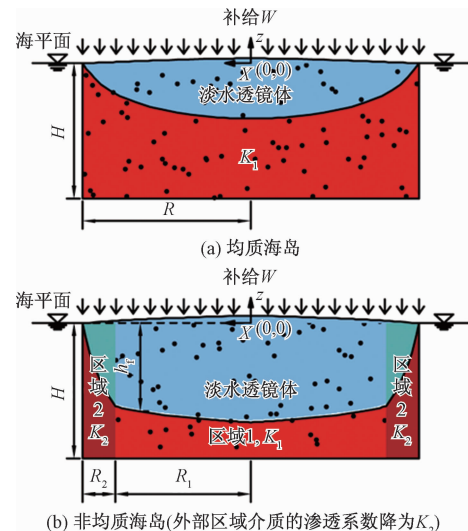


图 1 概念模型

Fig. 1 Conceptual model

2 物理模型

2.1 实验装置

室内物理模型见图 2。物理模型由砂槽、定水头水箱和蠕动泵组成。砂槽尺寸为 $60 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$ (长×宽×高)。考虑到海岛的对称性,只模拟海岛的左半部分,砂槽右侧是完全封闭的不透水边界。砂槽设置水平不透水底板,正面及两侧由透明玻璃阻挡。砂槽内部分为海水填充区(5 cm)和介质填充区(55 cm),两者之间用筛网隔开,起到挡砂作用。砂槽内砂子填充高度为 28 cm。砂槽左侧的定水头水箱通过 4 根进水管持续不断地补充海水,防止海水被稀释,蓄水区上端稀释的海水由一根出水管排出。出水管用

于保证海水水位稳定在 24.3 cm, 用于形成定水头边界。模拟降雨时, 通过蠕动泵精确控制流量。15 个渗水孔均匀分布在砂槽上部, 间距为 3.8 cm。渗水孔与一台蠕动泵的管道连接, 降雨通过管道均匀入渗到平坦的砂子表面。蠕动泵的总流量设为 30.015 mL/min。

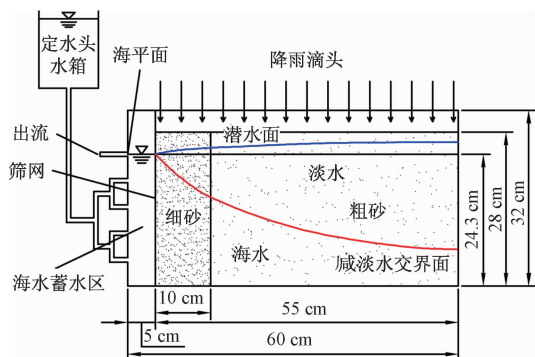


图2 实验装置图

Fig. 2 Sketch of the physical model

2.2 实验方案

实验中使用的粗砂和细砂经达西渗流实验测得渗透系数分别为 7 490.9 m/d 和 230.7 m/d。海水由淡水加入 NaCl 配制而成, 并加入诱惑红染色剂染色。测得淡水和海水的密度分别为 999.2 kg/m³ 和 1 024.9 kg/m³。

实验前, 将砂子洗净, 备用。打开进水管, 启动蠕动泵, 观察淡水透镜体在含水层中的形成与演变。咸淡水交界面位置的变化过程通过一台佳能 IXUS175 照相机进行实时记录。实验共分为两组。第一组实验中, 采用均质粗砂进行。第二组实验中, 粗砂左侧填入长度为 10 cm 的细砂。实验持续运行直至达到稳态。两组实验进行咸淡水交界面位置的对比分析。

3 数值模拟

采用 SEAWAT—2000^[28] 进行数值模拟。SEAWAT—2000 是基于有限差分方法对二维及三维情境下孔隙介质中的变密度地下水流动进行模拟的程序。它的源代码是将 MODFLOW 和 MT3DMS 耦合为一个单独的程序去解密度影响下的地下水流与溶质运移方程。

3.1 控制方程

多孔介质中变密度地下水流的控制方程为:

$$\nabla \cdot \left[\rho K \left(\nabla \cdot h_f + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \nabla z \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K ——渗透系数/(m·d⁻¹);

Z ——垂直方向的坐标, 以向上为正/m;

h_f ——等效淡水水头/m;

ρ ——流体密度/(kg·m⁻³);

ρ_f ——淡水密度/(kg·m⁻³);

S_f ——等效淡水单位贮水率/m⁻¹;

θ ——有效孔隙率;

T ——时间/d。

溶质运移的控制方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{v}C) \quad (2)$$

式中: C ——溶质的浓度/(kg·m⁻³);

D ——水动力弥散系数/(m²·s⁻¹);

$\vec{v}$ ——流体速度/(m·s⁻¹)。

流体密度和浓度之间存在的经验关系为:

$$\rho = \rho_f + \varepsilon C \quad (3)$$

式中: ε ——密度浓度梯度, 约为 0.714 3。

3.2 基于实验室尺度的数学模型

为了模拟二维的砂槽实验, 数学模型中的所有设置都与实验一致, 包括模型大小、边界条件、含水层结构、水文地质参数等。模拟区域长 55 cm, 高 28 cm, 水平和垂直离散间距为 0.2 cm, 共剖分 38 640 个网格。在模型区域左侧, 由于海平面以下的区域四周浸没于海水之中, 因此设定为定水头和定浓度边界, 海平面以上的边界与外界不存在水量交换, 视为不透水边界。上侧为降雨入渗边界, 无蒸散发, 右侧和底部均为不透水边界。

粗砂和细砂的渗透系数分别为 520 cm/min 和 16 cm/min。给水度 S_y 取 0.15, 孔隙度取 0.30。纵向和横向弥散度分别假定 0.05 cm 和 0.005 cm, 取值参考文献[29-30]。左侧边界水头设置为 24.3 cm, 浓度设置为 0.035 g/cm³。降雨入渗补给强度设置为 0.181 9 cm/min。淡水和海水的密度分别设置为 1 g/cm³ 和 1.025 g/cm³。整个模型区域的初始浓度设置为 0 g/cm³。均质情况下的模拟时间设置为 12 h, 分层情况下的模拟时间设置为 48 h。时间步长设置为 0.01 min。模型中的参数值见表 1。

3.3 基于野外尺度的数学模型

为了定量研究降雨入渗补给强度、低渗透区的厚度及其渗透系数的大小对淡水透镜体体积的影响, 避免尺度效应对结果的影响, 需要构建基于野外尺度的数学模型。此外, 该模型可用于预测降低海岛外部区域介质材料渗透性后, 淡水透镜体再次达到稳态所需时间及淡水储量变化。

表 1 实验室尺度数学模型中的参数值

Table 1 Parameters for the tank-scale numerical model

参数	参数值
海岛半长/cm	55
海岛宽度/cm	3
填砂高度/cm	28
定水头海水水位/cm	24.3
网格边长/cm	0.2
模型层数	140
时间/h	12(均质),48(分层)
时间步长/min	0.01
降雨入渗强度/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.181 9
孔隙度	0.30
高 K 区的渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	520
低 K 区的渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	16
纵向弥散度/cm	0.05
横向弥散度/cm	0.005
淡水密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1
海水密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.025
海水浓度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.035
密度浓度梯度	0.714 3

考虑到海岛的对称性,模型的水平长度为海岛半长,设为 100 m。含水层高度为 50 m。剖分后网格大小为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。左侧为定水头和定浓度边界,水头为 48 m,浓度为 35 kg/m^3 。降雨入渗补给强度为 $0.005 7 \text{ m/d}$,底层和右侧均为无流边界。给水度取 0.1,孔隙度取 0.30。纵向和横向弥散度分别假定为 1 m 和 0.1 m。均质情况下的渗透系数取 100 m/d 。

在进行模型设计时,降雨入渗补给强度分别选取 0.001,0.002,0.003,0.004,0.005 m/d。低渗透区厚度与其渗透系数,分别选择了 5 个不同的值。选择的低渗透区厚度分别为 5,10,20,30,40 m,选择的低渗透区渗透系数分别为 10,5,1,0.2,0.1 m/d。

3.4 敏感性分析

在多组模拟的基础上,可对降雨入渗补给强度(W)、低渗透区的厚度(R_2)及其渗透系数(K_2)进行敏感性分析。上述参数作为单变量,其余参数为常量,研究淡水透镜体体积对模型中重要参数的响应规律,识别出对淡水透镜体体积影响较大的参数。本文调节 W 在 $0.001 \sim 0.005 \text{ m/d}$ 间变化, R_2 在 $5 \sim 40 \text{ m}$ 间变化, K_2 在 $0.1 \sim 10 \text{ m/d}$ 间变化。

4 结果与讨论

4.1 实验结果

实验达到稳态时的结果见图 3。咸淡水交界面随着时间的延长逐渐下降,经过一段时间后不再变化,即

达到稳态,形成一个突变界面。均质含水层介质情形下,实验达到稳态的时间约为 8 h;分层非均质含水层介质情形下,实验达到稳态的时间约为 24 h。分层非均质含水层情形下,咸淡水交界面的位置相比均质条件下有明显下降,说明在相同的降雨补给条件下,降低海岛外部区域介质的渗透系数可有效控制海水入侵,增大淡水透镜体的体积,这与预期结果相符,证明该方法可以增加地下淡水资源储量。

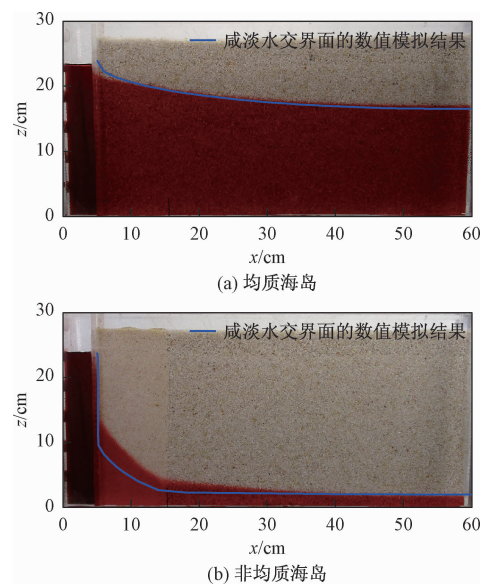


图 3 咸淡水交界面的位置的实验与模拟结果比较

Fig. 3 Comparison of the experimental and simulated steady state position of freshwater-saltwater interface

4.2 实验结果与数模结果的比较

将物理模型实验与数值模拟结果进行比较,见图 3。定义浓度为海水浓度 50% 的等值线作为咸淡水交界面的位置。两组实验中淡水透镜体的界面形态及淡水透镜体的最大厚度与数值模拟的结果较接近。物理模型与数学模型存在细微差别可能是由于以下几个原因:物理模型实验中降雨量和海平面有随时间的细微波动;砂子的结构和降雨入渗补给量的大小与理想的数学模型存在细微差别;在数学模型中不考虑非饱和带的流动过程。

4.3 基于野外尺度模型的敏感性分析结果

图 4(a)展示了降雨入渗补给强度为 $0.005 7 \text{ m/d}$ 、低渗透区的厚度为 5 m 时渗透系数与淡水透镜体体积的关系。达到稳态时的浓度分布见图 5(a)。显然, K_2 的减小使淡水透镜体的体积增大。

降雨入渗补给强度为 $0.005 7 \text{ m/d}$ 、渗透系数为 1 m/d 时低渗透区的厚度对淡水透镜体体积的影响如

图 4(b) 所示。达到稳态时的浓度分布见图 5(b)。低渗透区的厚度越大,淡水透镜体的体积越大。对比图 4(a)、(b) 可知,低渗透区的渗透系数对淡水透镜体体积的敏感性较其厚度大。

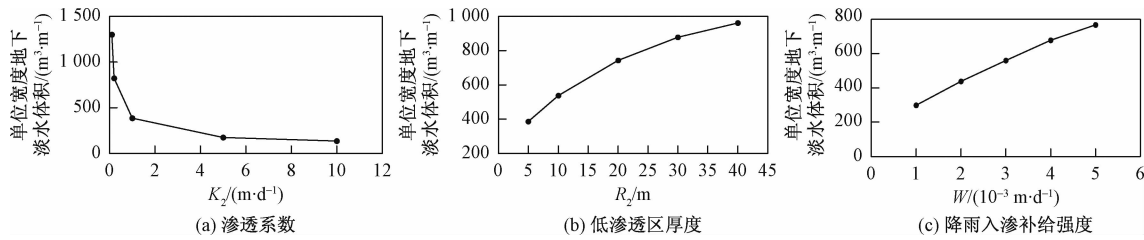


图 4 地下淡水体积对渗透系数、低渗透区厚度和降雨入渗补给强度的敏感性分析

Fig.4 Sensitivity of the fresh groundwater volume to hydraulic conductivity, the coastal less permeable unit extent and recharge rate from infiltration of precipitation

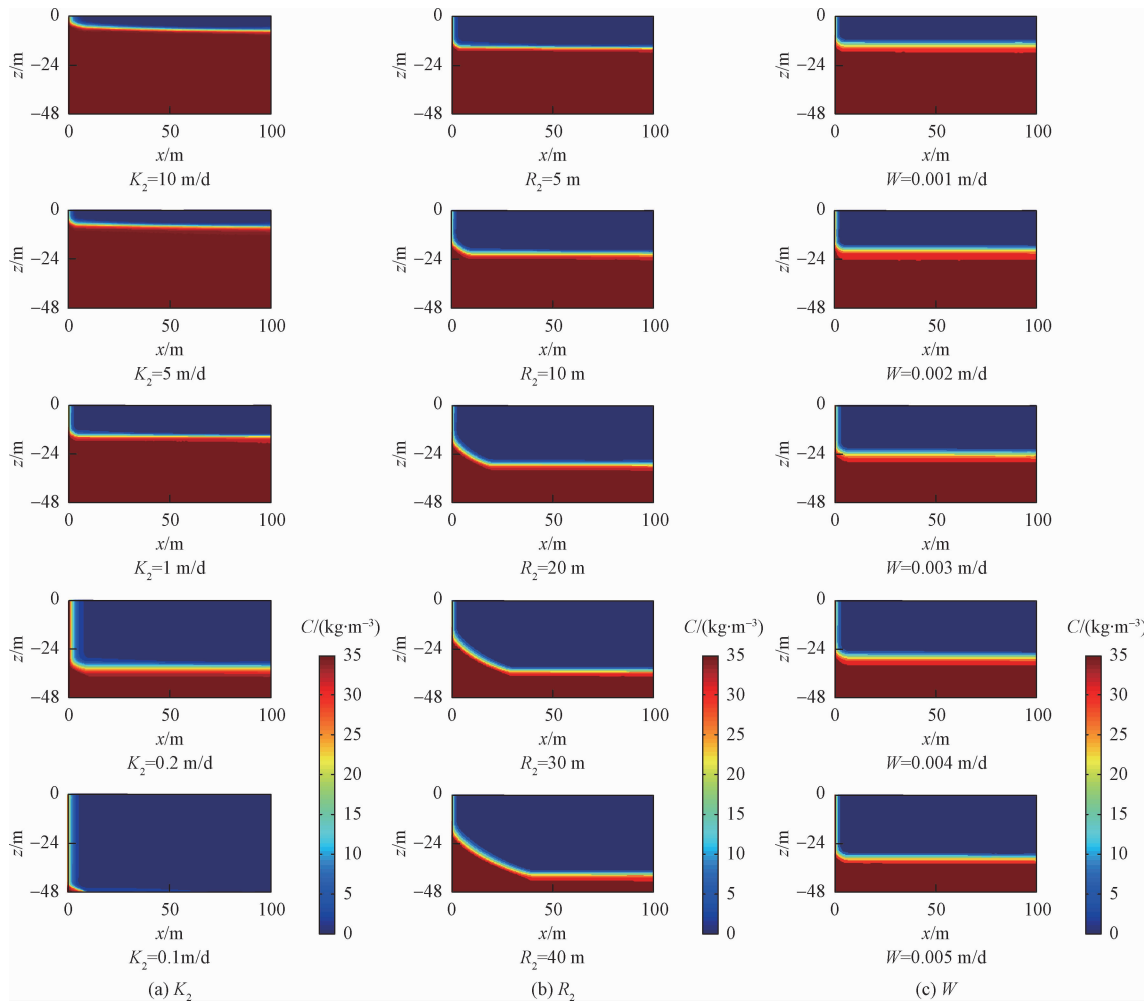


图 5 不同 K_2, R_2 和 W 时浓度分布图

Fig.5 Freshwater lens developed in cases with different K_2, R_2 and W

渗透系数为 0.2 m/d、低渗透区的厚度为 5 m 时,降雨入渗补给强度对淡水透镜体体积的影响如图 4(c) 所示。达到稳态时的浓度分布见图 5(c)。降雨入渗补给强度越大,淡水储量越大。对比图 4 可知,淡水

储量对降雨入渗补给强度的敏感度最大。

4.4 工程实施可能性分析

为探究工程实施的可能性,并提供理论依据,本文利用野外尺度的数学模型预测工程实施后淡水透镜体

再次达到稳态的时间及淡水资源储量变化。

该数学模型模拟一个长度为 200 m, 介质渗透系数为 100 m/d, 孔隙度为 0.3 的均质海岛。通过工程措施将海岛外部厚度为 5 m 的区域渗透系数降为 1 m/d。工程实施后, 淡水透镜体的体积变化如图 6 所示。海岛原有地下淡水储量为 $66.5 \text{ m}^3/\text{m}$, 工程实施约 8 年后淡水透镜体再次达到稳态, 地下淡水储量为 $343.8 \text{ m}^3/\text{m}$, 增加约 4 倍。结果表明淡水储量可在较短时间内实现大幅增长, 因此工程的实施具备一定的可能性。

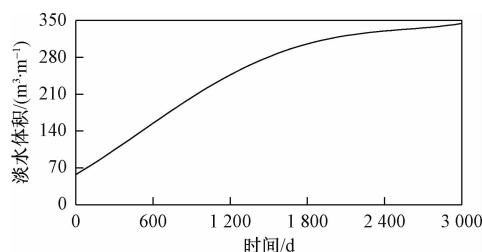


图 6 工程实施后海岛淡水储量随时间的变化

Fig. 6 Change in the volume of the freshwater lens with time after using the less-permeable unit

5 结论

(1) 敏感性分析结果表明淡水资源储量对降雨入渗补给强度的敏感度最大, 随着降雨入渗补给强度的增大而增大。海岛外部低渗透性介质材料的渗透系数对淡水透镜体体积的影响较其厚度大。低渗透区域的渗透系数越低、厚度越大, 淡水资源储量越大。

(2) 通过基于野外尺度的数值模拟分析工程实施的可能性, 发现对于降雨入渗补给强度为 0.0057 m/d 、长度为 200 m、孔隙度为 0.3、低渗透性介质材料的渗透系数为 1 m/d、厚度为 5 m 的长条形海岛来说, 淡水透镜体再次达到稳态所需时间为 8 a, 淡水资源储量增加约 4 倍。结果表明本研究提出方法可在较短时间内实现淡水资源储量的大幅增长。但本文未考虑降水量时空变化对淡水储量的影响, 还需从技术、经济、环境、政策等角度全面论证工程可行性。

参考文献 (References):

[1] 周罡, 戴桂林. 海岛经营性资源开发模式的比较研究[J]. 中国商贸, 2012(5): 152 - 153. [ZHOU G, DAI G L. Comparative study on island management resources development mode[J]. China Journal of Commerce, 2012(5): 152 - 153. (in Chinese)]

[2] 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.

[ZHOU C Z, FANG Z D, LIANG H G, et al. Numerical simulation of fresh water lens on coral island[J]. Marine Sciences, 2004, 28(11): 77 - 80. (in Chinese)]

[3] 周从直, 方振东, 梁恒国, 等. 雨量变化对珊瑚岛礁淡水透镜体的影响[J]. 中国给水排水, 2006, 22(1): 53 - 57. [ZHOU C Z, FANG Z D, LIANG H G, et al. Influence of rainfall on freshwater lens in a coral island[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(1): 53 - 57. (in Chinese)]

[4] 甄黎, 周从直, 束龙仓, 等. 海岛淡水透镜体演变规律的室内模拟实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(1): 81 - 85. [ZHEN L, ZHOU C Z, SHU L C, et al. Laboratory simulation experiment of evolution of island freshwater lens[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(1): 81 - 85. (in Chinese)]

[5] 赵军, 温忠辉, 束龙仓, 等. 海岛淡水透镜体形成及倒锥演变规律分析[J]. 工程勘察, 2009, 37(5): 40 - 44. [ZHAO J, WEN Z H, SHU L C, et al. Formation of freshwater lens in islands and evolution rules of the upconing[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(5): 40 - 44. (in Chinese)]

[6] 周从直, 何丽, 杨琴, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体三维数值模拟研究[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 560 - 566. [ZHOU C Z, HE L, YANG Q, et al. Three-dimensional numerical simulation of freshwater lens in coral islands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 560 - 566. (in Chinese)]

[7] 周从直, 譙华, 杜蓉. 珊瑚岛淡水透镜体的模拟与开发[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(3): 1 - 10. [ZHOU C Z, QIAO H, DU R. Simulation and exploitation of the freshwater lens in coral island[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2016, 32(3): 1 - 10. (in Chinese)]

[8] 盛冲, 许鹤华, 张文涛. 地貌变化对永兴岛淡水透镜体影响的数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 7 - 14. [SHENG C, XU H H, ZHANG W T. Numerical simulation of the effect of geomorphologic changes on freshwater lens in the Yongxing Island[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 7 - 14. (in Chinese)]

[9] UNDERWOOD M R, PETERSON F L, VOSS C I. Groundwater lens dynamics of Atoll Islands[J]. Water Resources Research, 1992, 28(11): 2889 - 2902.

[10] STOECKL L, HOUBEN G. Flow dynamics and age

- stratification of freshwater lenses: experiments and modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 458/459: 9 – 15.
- [11] DOSE E J, STOECKL L, HOUBEN G J, et al. Experiments and modeling of freshwater lenses in layered aquifers: Steady state interface geometry[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509: 621 – 630.
- [12] STOECKL L, WALTHER M, GRAF T. A new numerical benchmark of a freshwater lens[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 2474 – 2489.
- [13] GINGERICH S B, VOSS C I, JOHNSON A G. Seawater-flooding events and impact on freshwater lenses of low-lying Islands: Controlling factors, basic management and mitigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 676 – 688.
- [14] WERNER A D, SHARP H K, GALVIS S C, et al. Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 819 – 844.
- [15] POST V E A, BOSSERELLE A L, GALVIS S C, et al. On the resilience of small-island freshwater lenses: Evidence of the long-term impacts of groundwater abstraction on Bonriki Island, Kiribati[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 133 – 148.
- [16] COZZOLINO D, GREGGIO N, ANTONELLINI M, et al. Natural and anthropogenic factors affecting freshwater lenses in coastal dunes of the Adriatic Coast [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 804 – 818.
- [17] HOLT T, GRESKOWIAK J, SEIBERT S L, et al. Modeling the evolution of a freshwater lens under highly dynamic conditions on a currently developing barrier island[J]. *Geofluids*, 2019, 2019: 1 – 15.
- [18] POST V E A, GALVIS S C, SINCLAIR P J, et al. Evaluation of management scenarios for potable water supply using script-based numerical groundwater models of a freshwater lens[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 843 – 855.
- [19] MAHESHA A. Effect of strip recharge on sea water intrusion into aquifers [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2001, 46(2): 199 – 210.
- [20] MANTOGLIOU A. Pumping management of coastal aquifers using analytical models of saltwater intrusion [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(12): 1335.
- [21] SUN D M, SEMPRICH S. Using compressed air injection to control seawater intrusion in a confined coastal aquifer[J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 100(2): 259 – 278.
- [22] LU C H, SHI W L, XIN P, et al. Replenishing an unconfined coastal aquifer to control seawater intrusion: Injection or infiltration? [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(6): 4775 – 4786.
- [23] 赵洁, 林锦, 吴剑锋, 等. 大连周水子海水入侵区地下水多目标优化管理模型[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(5): 25 – 32. [ZHAO J, LIN J, WU J F. A multi-objective simulation-optimization model for optimal control of seawater intrusion in the Zhoushuizi district of Dalian[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 25 – 32. (in Chinese)]
- [24] SAEED M M, BRUEN M, ASGHAR M N. A review of modeling approaches to simulate saline-upconing under skimming wells [J]. *Nordic Hydrology*, 2002, 33(2/3): 165 – 188.
- [25] HERNDON R, MARKUS M. Large-scale aquifer replenishment and seawater intrusion control using recycled water in Southern California [J]. *Boletín Geológico y Minero*, 2014, 125(2): 143-155.
- [26] STRACK O D L, STOECKL L, DAMM K, et al. Reduction of saltwater intrusion by modifying hydraulic conductivity [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 6978 – 6988.
- [27] 姜海波, 赵云鹏, 程忠庆. 偏远岛礁就地供水保障模式分析[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(3): 99 – 102. [JIANG H B, ZHAO Y P, CHENG Z Q. Analysis for freshwater supply mode in situ of remote islands[J]. *Engineering Science*, 2014, 16(3): 99 – 102. (in Chinese)]
- [28] LANGEVIN C, THORNE D J, DAUSMAN A, et al. User's guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow[M]. Reston, Virginia: US Geological Survey, 2007.
- [29] BROVELLI A, MAO X, BARRY D A. Numerical modeling of tidal influence on density-dependent contaminant transport[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(10): W10426.
- [30] GOSWAMI R R, CLEMENT T P. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4): W04418.

编辑: 张若琳