

边坡防渗增加灰沙岛地下淡水的试验与数值模拟研究

李英豪, 韩冬梅, 曹天正, 宋献方, 蔡砥柱

A study of the increase in subsurface freshwater on coral islands by slope seepage control: Experiment and modeling

LI Yinghao, HAN Dongmei, CAO Tianzheng, SONG Xianfang, and CAI Dizhu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 罗剑 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 1-7

非稳态潜流交换过程研究进展

Research progress of the unsteady hyporheic flow exchange process

吴成城, 张小琴, 鲁程鹏, 束龙仓, 刘波 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 157-165

水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table

潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154-163

基于离心机数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141-150

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204006

李英豪, 韩冬梅, 曹天正, 等. 边坡防渗增加灰沙岛地下淡水的试验与数值模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 13-22.
LI Yinghao, HAN Dongmei, CAO Tianzheng, *et al.* A study of the increase in subsurface freshwater on coral islands by slope seepage control: Experiment and modeling [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 13-22.

边坡防渗增加灰沙岛地下淡水的试验与数值模拟研究

李英豪^{1,2}, 韩冬梅^{1,2}, 曹天正^{1,3}, 宋献方^{1,2}, 蔡砥柱⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南 海口 570100)

摘要: 地下淡水是支撑海岛居民生活用水保障和生态岛屿建设的重要战略资源。目前海岛淡水资源十分匮乏, 鉴于我国灰沙岛的现实复杂性, 亟需实施低成本、易操作且对岛礁稳定性及生态系统影响较小的增加地下淡水的措施。本研究提出了采用在海陆边坡处铺设防渗材料人为干预地下淡水体形成、增加淡水储量的措施, 并通过砂箱试验和数值模拟相结合的方法在实验室尺度下分析了边坡防渗对灰沙岛淡水透镜体形成的影响, 评估了不同因素在边坡防渗条件下增加地下淡水储量的效果, 并以永兴岛为例定量评估了边坡防渗对地下淡水储量的影响。研究表明, 边坡防渗通过改变地下水流场、增加淡水水头的方式增加了淡水储量。淡水体所需的稳定时间随之增加。在长、宽、高分别为 50、5、35 cm 的砂箱中, 在 35° 的边坡处铺设 14 cm 长的隔水材料, 淡水透镜体达到稳定后最大厚度由原有的 13.7 cm 增加至 24.9 cm, 淡水储量由 561.8 cm³ 增加至 1 592.3 cm³, 所需稳定时间由 120 min 增加至 150 min。增加的淡水储量随降雨强度增加、砂体渗透系数减小、边坡防渗深度增加、防渗材料渗透系数减小而增加。若在永兴岛海陆边坡铺设 2 m 深的隔水材料, 在未来 30 a, 淡水储量将由天然状态的 3.4×10⁶ m³ 增加至 4.4×10⁶ m³, 增加原有储量的 1/4。研究可为我国岛屿地下淡水科学管理、水资源安全保障提供理论支撑和实践指导。

关键词: 边坡防渗; 灰沙岛; 淡水透镜体; 数值模拟; 砂箱试验

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0013-10

A study of the increase in subsurface freshwater on coral islands by slope seepage control: Experiment and modeling

LI Yinghao^{1,2}, HAN Dongmei^{1,2}, CAO Tianzheng^{1,3}, SONG Xianfang^{1,2}, CAI Dizhu⁴

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou, Hainan 570100, China)

Abstract: Fresh groundwater lenses are important resources for local inhabitants and ecosystems in coral islands.

收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-06-17

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277066); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA13010303); 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心地质调查专项项目(ZD20220606)

第一作者: 李英豪(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liyinghao1211@163.com

通讯作者: 韩冬梅(1978-), 女, 博士, 研究员, 主要从事滨海地下水水文过程和海水入侵研究。E-mail: handm@igs nrr.ac.cn

In view of the complexity of the coral islands, it is necessary to seek the measures of low-cost, effective and less impact on the stability and the ecosystem to increase freshwater reserves. Based on the sandbox experiments and numerical simulations, this study proposes an engineering measure to increase freshwater reserves by laying impermeable materials on the slope of an island. The effects of the measure on fresh groundwater lenses formation and different factors on increasing freshwater reserves in slope seepage prevention are evaluated. The practical feasibility of this measure is also discussed in case of the Yongxing Island. The results show that the slope seepage control increases the freshwater reserves by changing the groundwater flow field to increase the freshwater head. The stabilization time of the freshwater lens is also increased. After laying impermeable materials on slope of the sandbox (with the length, width and height of 50 cm, 5 cm and 35 cm, respectively), the maximum thickness of freshwater lens increases from 13.7 cm to 24.9 cm, the freshwater reserves increases from 561.8 cm^3 to $1\,592.3 \text{ cm}^3$, and stabilization time increases from 120 min to 150 min, respectively. The increased freshwater reserves develop with the increasing rainfall intensity and slope impermeable depth, and also extend with the decreasing permeability of coral sand and impermeable materials. The Yongxing Island is taken as an example, and laying impermeable materials with a depth of 2 m on the slope will increase the freshwater reserves from $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ to $4.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ in the next 30 years, increasing the original reserve by 1/4. This study can provide theoretical support and practical guidance for sustainable groundwater management and water resources security in island areas of China.

Keywords: slope seepage control; coral islands; freshwater lenses; numerical simulations; sandbox experiments

灰沙岛是由珊瑚等海洋生物残骸堆积形成的岛屿^[1]。我国的灰沙岛主要分布在南海区域,是海洋资源开发的重要支点。由于这些岛大多远离大陆且缺乏地表水资源,地下淡水是支撑岛上居民生活、维持生态涵养的重要淡水资源^[1-4]。灰沙岛的地下淡水是降雨下渗至含水层,由于密度差悬浮于海水之上的中间厚两边薄的淡水体,也被称为“淡水透镜体”(Freshwater Lens)^[5-6]。目前,我国正处于建设生态宜居岛屿的进程中,淡水透镜体的形成对于土壤淡化——岛屿绿化过程起着关键作用^[7]。然而,受海平面上升、过度开采等自然和人为因素影响,淡水透镜体厚度薄、储水量小,十分脆弱^[8-9]。如何人为干预淡水透镜体的形成、增加地下淡水的储量,成为了灰沙岛开发建设亟需解决的重要问题。

淡水透镜体的形成主要受降雨补给和地下水向海排泄控制,受岛屿水文地质、气候、潮汐、岛屿几何形态特征、植被分布、人类活动等多因素影响^[5-6]。常用的研究方法包括解析模型、地球物理勘探、数值模拟及砂箱试验等。我国对于淡水透镜体的研究发展十分迅速,在二十世纪八九十年代,中国科学院通过野外调查评估了西沙群岛的地下水资源^[10];周从直等^[11-12]基于气象数据利用 Modflow 计算了永兴岛地下淡水在不同降雨强度下的储量变化;甄黎等^[13]、赵

军等^[14]利用室内物理模型模拟了淡水透镜体的形成过程;赵焕庭等^[1-2]、周从直等^[3,15]综述了淡水透镜体形成发育的影响因素及开发利用存在的问题。目前对于人为干预淡水透镜体形成、增加地下淡水储量的措施研究较少,部分学者根据滨海地区防治海水入侵的方法提出了减少开采、人工回灌等措施^[16-18],但我国灰沙岛地区目前已全面禁止开采地下水,人工回灌仅能使用海水淡化水或大陆运水,成本高昂。盛冲等^[19]、Sheng 等^[20]验证了填海造陆有助于增加地下淡水的储量,但填海造陆受政策制约且工程成本高。此外,地下坝、防渗墙等物理屏障^[21-22]在灰沙岛施工困难,容易破坏储油库等地下工程设施,对周边的珊瑚生态系统影响较大,难以在实践中应用。目前缺少一种低成本、易操作的工程措施,既能增加淡水储量,又能尽量减少对岛屿工程建设及生态系统的影响。鉴于此,本次提出了在灰沙岛海陆边坡铺设防渗材料增加地下淡水储量的设想。

本研究旨在探明边坡防渗对灰沙岛淡水透镜体形成及淡水储量的影响。鉴于野外现场试验实施困难,采用珊瑚砂箱试验物理模拟与数值模拟相结合的方法在实验室尺度下对比淡水透镜体在有无边坡防渗措施下的形成过程;并基于数值模型评估了边坡防渗深度、防渗材料渗透性、含水层渗透性、降雨强度

等因素在边坡防渗情境下增加淡水储量的效果。此外,以永兴岛为例探讨了野外尺度下边坡防渗措施的可行性。研究有助于保障我国岛屿的水资源安全,为我国加速生态岛屿建设进程提供参考。

1 概念模型

灰沙岛的地势较低,海拔高程一般在 3~5 m,发育于礁坪上,侧缘多呈小角度斜坡^[3]。灰沙岛普遍为二元地质结构,上层为松散未胶结的全新统沉积物,下层为更新统礁灰岩,渗透性比全新统高 1~2 个数量级^[23]。淡水体主要赋存在全新统含水层中^[7],因此概念模型暂不涉及更新统地层。概念模型基于理想对称的长条状岛屿,假设含水层为均质含水层,砂体的渗透系数为 K_1 ,岛长为 L_1 ,边坡的角度为 θ 。降雨补给强度为 R ,海水水位为 H_0 ,见图 1(a)。天然条件下淡水透镜体的最大水头高度为 h_1 ,最大厚度为 Z_1 ,所需稳定时间为 t_1 。在边坡铺设渗透系数为 K_2 ($K_2 < K_1$),长度为 L_2 的低渗透材料,地下淡水的最大水头高度及最大厚度变为 h_2 , Z_2 ,见图 1(b)。淡水体所需稳定时间为 t_2 。

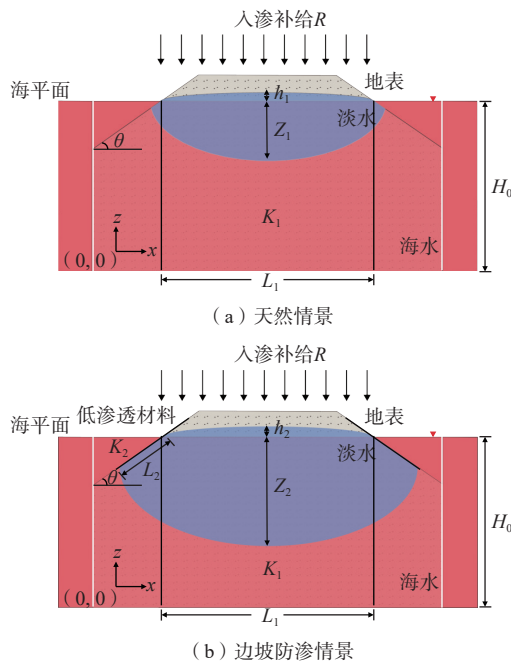


图 1 灰沙岛淡水透镜体的概念模型

Fig. 1 Conceptual models of freshwater lens in coral islands

2 研究方法

2.1 砂箱试验

基于前人设计物理模型的经验^[24-25],设计长、宽、

高分别为 70, 5, 45 cm 的丙烯酸长方体(图 2)。装置主体由多孔介质区和海水区组成,二者用 100 目尼龙筛网隔开,用来透水和隔砂。海水区位于装置两侧,咸水水头为 35 cm。通过蠕动泵持续向海水区提供浓度恒定的咸水,底部溢流管用来控制水头稳定。多孔介质区位于中间,填砂高度为 38.5 cm。边坡角度为 35°,边坡可设置防渗深度与全新统含水层厚度的比例在 1:5 左右,较符合我国灰沙岛的实际情况。由于灰沙岛面积小,边坡水平长度与岛屿长度的比例较大。砂箱模型对边坡的比例进行了一定程度的放大,有助于探究边坡控制对淡水透镜体形成的影响机制。

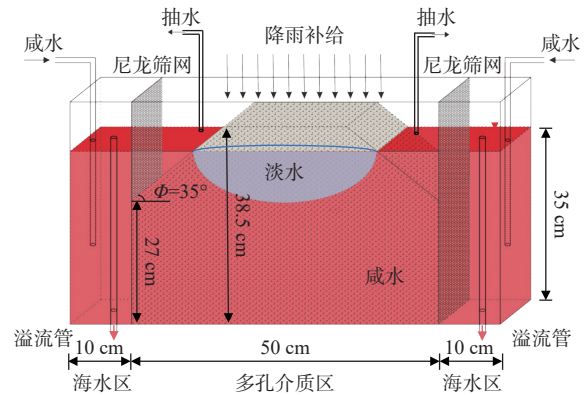


图 2 砂箱物理模型

Fig. 2 Physical model of sandbox

介质区上部用蠕动泵和多根塑胶管组成降雨装置。利用两个蠕动泵在砂体的左右两侧进行小流量抽水,保持试验过程中咸水质量浓度不变。利用染色剂对咸水进行示踪,观测淡水体的形成。

由于氯离子比较稳定,咸水用纯水和固体 NaCl 配制,质量浓度为 35 g/L。用曙红($C_{20}H_6Br_4Na_2O_5$)将咸水染为红色,染色剂的使用剂量为 0.3 g/L。曙红染色剂与珊瑚砂和丙烯酸有机玻璃不发生反应^[24]。利用密度计测定染色咸水和淡水的密度分别为 1.031, 0.998 g/cm³。多孔介质选择粒径为 1~2 mm 的珊瑚砂(取自南海某珊瑚岛),通过渗透试验测定其渗透系数为 20.0 cm/min(由于砂体经过筛分,渗透系数较大)。结合干密度和相对密度计算得到其孔隙度为 0.53,通过筒测法测定其给水度为 0.33。防渗材料选择油基黏土(俗称橡皮泥),完全隔水且不溶于水。咸淡水界面可通过颜色区分。

砂箱试验的具体流程为:珊瑚砂经淡水淋滤去除盐分后,按照 1.3 g/cm³ 的干密度填入介质区,之后从底部注入盐水,使砂体饱和,减少孔隙中滞留的空

气。待咸水水位到达 35 cm, 稳定一段时间后, 打开控制降雨的蠕动泵, 流速为 90 mL/min, 同时打开抽取被稀释海水的蠕动泵, 流量设置为 40 mL/min。通过相机记录淡水透镜体的形成过程, 若淡水透镜体形态在 15 min 内保持不变, 即视为达到稳态。相机记录 210 min 后, 关闭降雨补给, 待海水浸没砂体一段时间后, 在砂体的边坡处设置油基黏土, 覆盖范围为坡脚至海平面上 1~2 cm 处, 厚度约为 2 cm。设置完成后, 重新打开控制降雨的蠕动泵, 速率保持不变。之后, 利用相机持续记录 210 min, 观察淡水体的形成过程。

2.2 变密度流与溶质运移模型

由于咸淡水均属于可混溶性液体, 需要考虑过渡带的存在以及对流-弥散作用, 本研究采用 GMS 软件基于 SEAWAT-2000 模拟室内的砂箱试验。SEAWAT 耦合了 MODFLOW 和 MT3DMS, 用于分别描述变密度下的水流运动以及地下水中盐分的运移^[26]。其中, 多孔介质中变密度流运动微分方程为:

$$K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) + K\eta \frac{\partial c}{\partial z} = S_s \frac{\partial H}{\partial t} + \eta \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\rho}{\rho_0} q_s \quad (1)$$

式中: K ——渗透系数/(cm·min⁻¹);

H ——测压管水头/cm;

c ——混合流体密度/(g·cm⁻³);

S_s ——贮水率;

t ——时间/min;

ρ_0 ——淡水密度/(g·cm⁻³);

q_s ——单位体积多孔介质的源汇项强度/min⁻¹;

η ——密度耦合系数;

ρ ——混合流体密度/(g·cm⁻³)。

溶质运移微分方程为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \left(\frac{\partial c}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + \frac{(c^* - c)}{n} q_s \quad (2)$$

式中: u_i ——渗透流速/(cm·min⁻¹);

D_{ii} ——弥散系数/(cm²·min⁻¹);

c^* ——源或汇的流体质量浓度/(g·cm⁻³);

n ——孔隙度。

稳定时淡水储量的计算公式为^[27]:

$$V = \mu \sum_i \sum_j S H_{i,j} \quad (3)$$

式中: V ——贮水量/cm³;

μ ——给水度;

S ——单位网格的面积/cm²;

$H_{i,j}$ ——每个网格的淡水厚度/cm。

数值模拟不考虑非饱和带, 含水层参数设置均基于室内砂箱试验。溶质运移因子选定为 Cl⁻, 模拟范围为海平面以下 35 cm 的区域。顶部边界设置为定流量边界, 接受降雨补给。侧向边界设置为定水头定浓度边界, 水头值为 0, Cl⁻质量浓度为 19 g/L。边坡防渗处理前后的初始状态均设置为完全被海水浸没, 模型的初始水头为 0, Cl⁻质量浓度为 19 g/L。模型参数来源于实验室实测和相关文献, 如表 1 所示。

表 1 数值模型的参数设置

Table 1 Parameters used in the numerical model

模型参数	取值	取值依据
砂体渗透系数/(cm·min ⁻¹)	20.00	实验室实测
防渗材料渗透系数/(cm·min ⁻¹)	0	实验室实测
降雨入渗强度/(cm·min ⁻¹)	0.6	实验室实测
纵向弥散度/cm	0.5	文献[24-25]
横向弥散度/cm	0.05	文献[24-25]
淡水密度/(g·cm ⁻³)	0.998	实验室实测
海水密度/(g·cm ⁻³)	1.031	实验室实测
孔隙度	0.53	实验室实测
给水度	0.33	实验室实测

采用有限差分法离散数值模型, 剖分网格尺寸为 0.5 cm×0.5 cm, 平面共剖分为 6 648 个有效单元格。总模拟时间为 210 min, 步长设置为 0.01 min。根据前人研究, 选取 Cl⁻浓度为 0.6 g/L 的界线为淡水透镜体的下界面, 即咸淡水界面^[27]。数值模拟主要用于与室内试验相互验证和进行下一步分析。

3 结果

3.1 边坡防渗前淡水透镜体的形成过程

边坡防渗前砂箱试验和数值模拟中淡水透镜体的形成过程如图 3 所示, 砂箱试验中淡水体厚度随时间不断增加, 在 120 min 左右趋于稳定, 在 30, 60, 90 min 和到达稳态的淡水体最大厚度分别为 10.2, 12.5, 13.4, 13.7 cm。数值模拟观测到的过程与试验过程相似, Cl⁻质量浓度为 0.6 g/L 的界线与砂箱试验咸淡水界面拟合较好, 尤其是观测到的淡水体最大厚度基本一致, 在 30, 60, 90 min 和到达稳态的淡水体厚度分别为 10.1, 12.5, 13.5, 13.7 cm。不同的是数值模拟可以较好地观察到过渡带的存在, 而在砂箱试验中由于染色剂的色散效应, 仅能观测到突变界面。

3.2 边坡防渗后淡水透镜体的形成过程

边坡防渗后, 淡水透镜体的形成过程如图 4 所示。相较于边坡防渗前, 砂箱试验中淡水体的厚度和

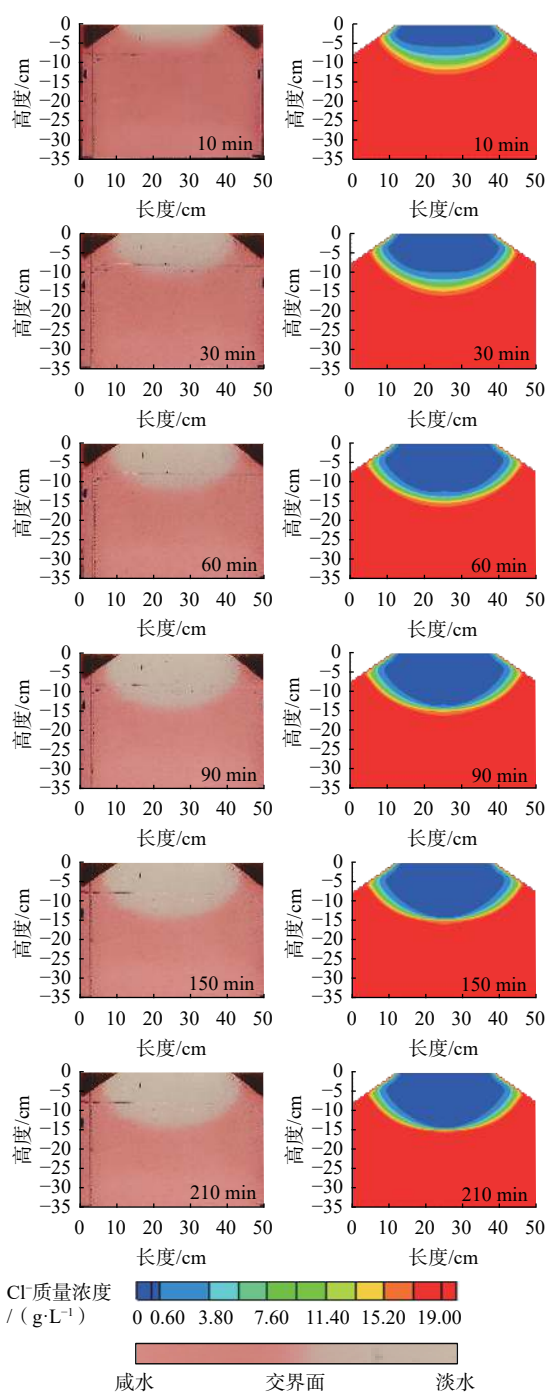


图3 边坡防渗前淡水透镜体的形成过程

Fig. 3 Formation process of freshwater lens before seepage control of slope

宽度均明显增加, 达到稳态的最大厚度由边坡防渗前的 13.7 cm 增加到 24.9 cm。所需稳定时间也随之增加, 由防渗前的 120 min 增加到防渗后的 150 min。数值模拟结果与试验结果在临近海岸处存在一定差别, 这是因为数值模拟在靠近海岸处的计算精度较低, 误差较大。

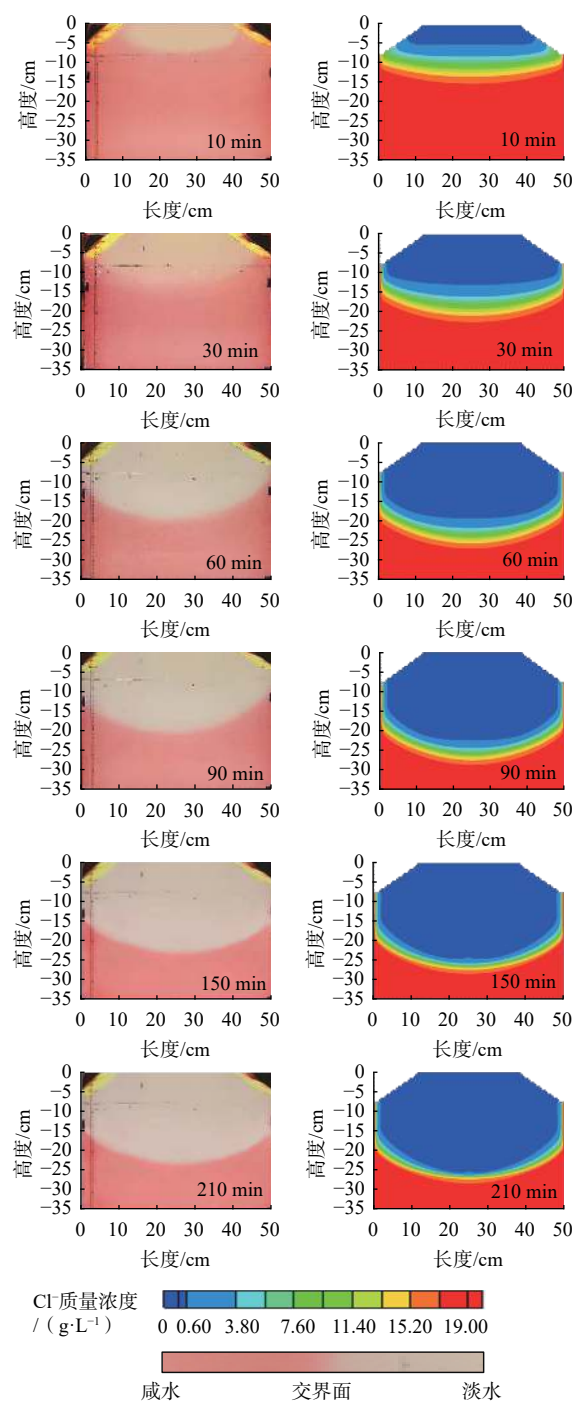


图4 边坡防渗后淡水透镜体的形成过程

Fig. 4 Formation process of freshwater lens after seepage control of slope

室内试验与数值模拟得到的淡水体厚度和淡水储量如图5所示, 二者观测的淡水体最大厚度基本一致, 误差在 7% 之内。数值模拟结果与试验观测结果在流出面有较为明显的差异, 这是因为数值模型会高估海岸流出面的大小^[25], 边壁效应和砂体填充的非均质性也会导致数学模型和观测结果出现一定程度的

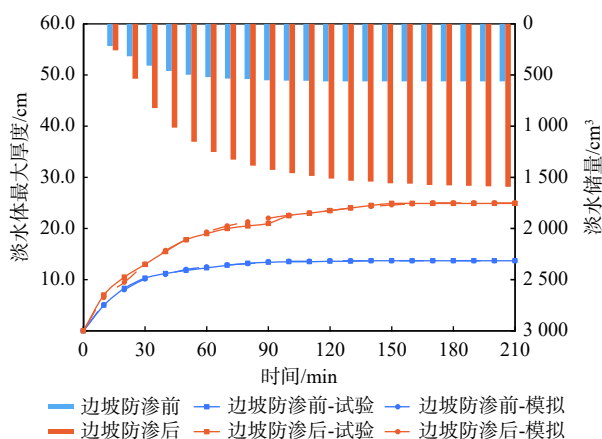


图 5 数值模拟和室内试验得到的淡水体最大厚度和淡水储量

Fig. 5 Maximum thickness of freshwater lens and freshwater reserves obtained by numerical simulation and experiments

误差^[24]。

通过数值模拟计算得到, 淡水储量由边坡防渗前的 561.8 cm^3 增加至防渗后的 1592.3 cm^3 , 增加了原有

淡水体积的 183.4%, 效果十分显著。

4 讨论

4.1 边坡防渗增加地下淡水储量的原因

实施边坡防渗后, 淡水储量可由原有的 561.8 cm^3 增至 1592.3 cm^3 , 增加了接近 3 倍。通过分析达到稳态时边坡防渗前后地下水的水头和流场分布 (图 6), 发现在边坡铺设防渗材料后, 由于上部海陆边界的渗透性急剧下降, 流场发生了明显变化, 淡水排泄区由海平面下 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 明显下移至海平面下 $10 \sim 17 \text{ cm}$, 排泄基点变化导致流线明显变长、地下水水头明显升高。基于 Ghyben-Herzberg 公式, 淡水体的厚度以及淡水储量也随之增加。由于流场的变化, 地下水达到稳定所需的响应时间变长, 与试验所得的结果一致。大部分淡水流线的出口集中在上部, 通过封堵含水层上部阻碍淡水排泄达到了增加淡水储量的目的。

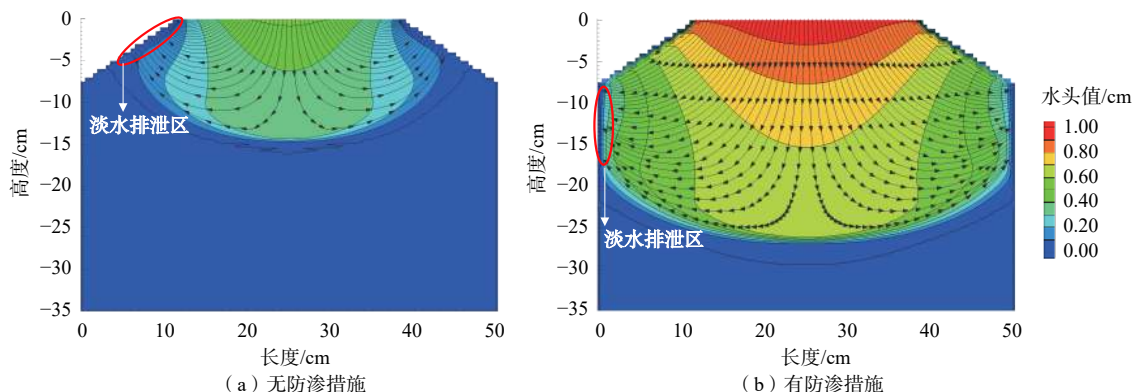


图 6 地下水水头及流场分布

Fig. 6 Distribution of groundwater head and flow field

边坡防渗与以往在滨海地区修建防渗墙防治海水入侵类似, 均是通过封堵含水层上部阻碍淡水排泄达到淡化的目的^[28]。不同的是, 防渗墙的深度一般设置的比较深, 有学者提出了垂直穿透整个含水层的低渗透性屏障^[21]。但对于灰沙岛来说, 全新世和更新世的不整合面位置决定了淡水体的最大赋存深度。淡水在穿过不整合面后由于更新统礁灰岩的高渗透性迅速流失, 且这种不整合面的位置仅位于海平面下十几米至二十米的位置^[7, 19]。因此与大陆含水层不同, 岛礁含水层并不需要深度较大的防渗墙, 仅在边坡处做防渗措施, 可以低成本地实现地下淡化水体的最大化, 且不会影响岛礁的地下工程设施。

4.2 不同因素对边坡防渗增加淡水效果的影响

研究表明, 降雨强度、砂体渗透性、防渗材料渗透

性、防渗长度是影响防渗墙等物理屏障发挥作用的重要因素^[29]。实际情景中砂体渗透系数和降雨补给具有明显的空间异质性。为进一步分析边坡防渗增加淡水储量的效果, 选取降雨强度 R 、砂体渗透系数 K_1 、边坡防渗长度 L_2 、防渗材料渗透系数 K_2 作为典型要素, 基于经砂箱试验验证的数值模型, 分析不同因素在边坡防渗后较防渗前增加淡水储量的效果。参数赋值如表 2 所示, 不同参数对增加淡水储量的影响如图 7 所示。

砂体渗透系数越低、降雨强度越大、防渗材料渗透系数越低、防渗长度越大, 采用边坡防渗措施增加淡水的效果越显著。这说明边坡防渗在储水构造好、补给强度大的地方效果更明显。实际施工中需要考虑岛礁的实际情况, 选择适当的防渗深度。由于防

表 2 参数赋值	
Table 2 Parameters selection	
参数选取	参数赋值
降雨强度/(cm·min ⁻¹)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
砂体渗透系数/(cm·min ⁻¹)	12, 16, 20, 24, 28
边坡防渗长度/cm	2, 5, 8, 11, 14
防渗材料渗透系数/(cm·min ⁻¹)	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5

渗材料在岛上容易遭受自然和人为因素破坏, 导致渗透性升高, 增加淡水储量会明显减少, 因此定期检查防渗情况对保证该措施的效果至关重要。

4.3 边坡防渗增加地下淡水储量的现实可行性

为减少尺度的影响, 以我国典型的灰沙岛永兴岛为例, 基于盛冲等^[19]、周从直等^[27]的工作, 建立了野外

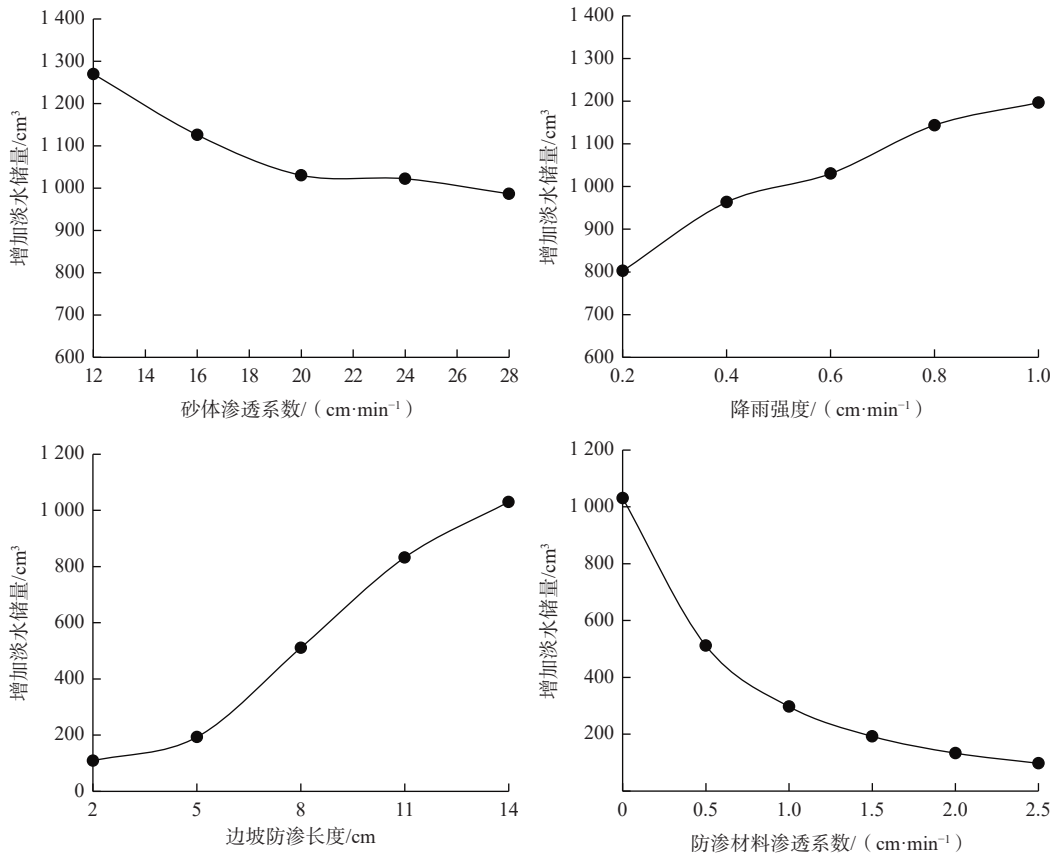


图 7 不同参数对增加淡水储量的影响

Fig. 7 Effect of different parameters on increasing freshwater reserves

尺度的数值模型, 预测该岛在实施边坡防渗措施后淡水储量的变化。由于近年永兴岛经过填海造陆, 岛上可划分为天然区域和填海造陆区, 二者渗透性有较大差别(填海造陆区的渗透系数为 5 m/d, 天然区域的渗透系数为 70 m/d)^[19]。永兴岛的水文地质剖面示意图见图 8, 全新统和更新统的分界线在海平面下 18 m 处^[3, 30]。

数值模型顶部设置为补给边界, 考虑永兴岛的多年平均降水量及当地蒸散发比例, 将降水补给均分至每天, 设置补给强度为 2.0 mm/d, 网格剖分为 32 m×26 m。将海陆交界边坡深度为 2 m 以内的单元格设置为不透水单元格。模型参数设置如表 3 所示。总模拟时间为 30 a。

地下水水头和淡水透镜体厚度呈一定比例关系^[31],

通过地下水水头反映永兴岛淡水水体厚度的空间分布。天然条件和边坡防渗状态下永兴岛水头值的空间分布见图 9。对比天然状态, 边坡防渗使中心高水头值的区域范围明显扩大, 且对靠近海岸的地区影响较大。数值模拟结果显示, 天然状态下地下淡水储量为 3 424 356 m³。盛冲等^[19]模拟计算 25 a 后永兴岛淡水储量为 3.3×10⁶ m³, 与本研究模拟结果相差不大。实施边坡防渗可使淡水储量在 30 a 内由 3 424 356 m³ 增加至 4 351 464 m³, 增加了 27.1%, 说明边坡防渗措施在野外尺度具备实施的可行性。

5 结论

(1)通过室内砂箱试验和数值模拟相结合的方法

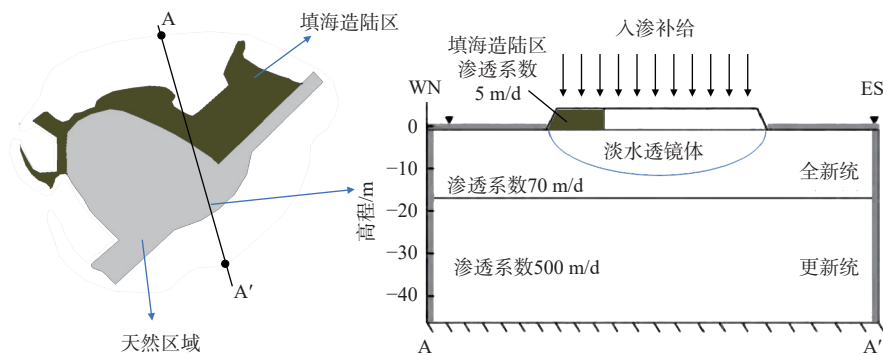


图 8 永兴岛的水文地质剖面示意图
Fig. 8 Hydrogeological profile of the Yongxing Island

表 3 野外尺度数值模型的参数设置
Table 3 Parameters used in the numerical model

参数选取	取值	来源
岛屿长度/m	3 600	/
岛屿宽度/m	2 800	/
含水层高度/m	40	/
孔隙度	0.45	文献[20]
给水度	0.10	文献[19]
天然区渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	70	文献[27]
人工填造区渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	5	文献[19]
全新世渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	70	文献[27]
更新世渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	500	文献[19]
纵向弥散度/m	3	文献[3]
横向弥散度/m	0.3	文献[3]
垂向弥散度/m	0.03	文献[3]

证明了边坡防渗增加灰沙岛地下淡水储量的措施是有效的。边坡防渗通过阻碍淡水排泄,改变地下水场,增加淡水水头的方式显著增加了淡水透镜体厚度

及地下淡水储量,但淡水水体达到稳定的时间变长。相较于防渗墙,边坡防渗成本更低,更容易实施。

(2)降雨强度越大、砂体渗透系数越低、防渗深度越大、防渗材料渗透性越差,边坡防渗增加淡水的效果越好。实际施工应结合岛礁实际情况选择合适的防渗深度,并定期检查防渗情况以保证效果。

(3)若在永兴岛采取边坡防渗措施,在海陆边坡处设置 2 m 深的防渗材料,可在未来 30 a 内增加原有天然地下淡水储量的 1/4,具有现实的工程意义。

目前的研究未考虑含水介质非均质性以及边界条件的动态变化对淡水储量的影响等问题,下一步研究需要结合实际岛礁地貌,综合考虑技术、环境、成本等多方面因素,提出更加完善、更具有可行性和操作性的工程措施。本研究结果获取的认识可为我国岛礁地下淡水资源的可持续开发利用和海岛居民生活用水保障和生态岛屿建设提供参考依据。

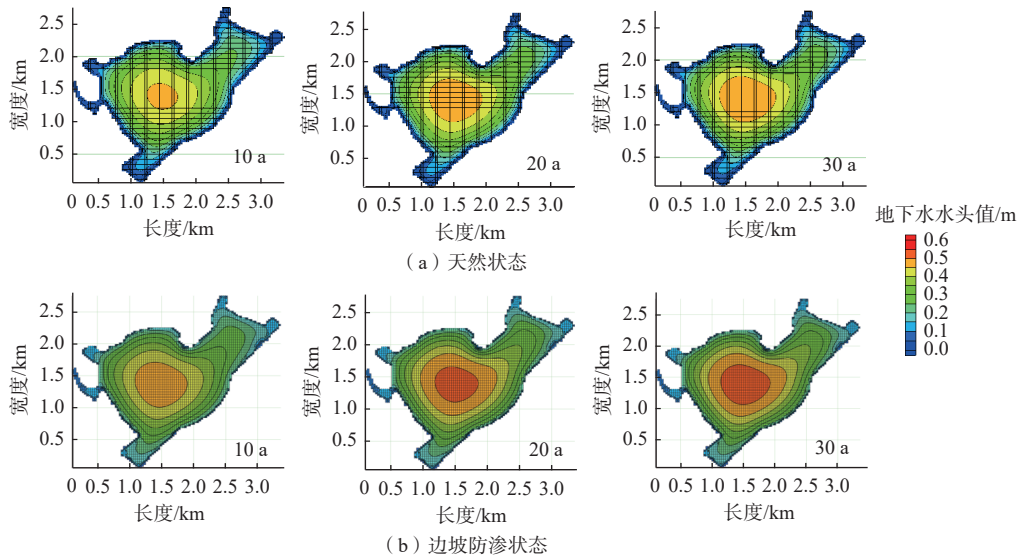


图 9 永兴岛的水头空间分布示意图
Fig. 9 Spatial distribution of water head of the Yongxing Island

参考文献 (References):

- [1] 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景. 南海诸岛灰沙岛淡水透镜体研究述评[J]. 海洋通报, 2014, 33(6): 601 – 610. [ZHAO Huanting, WANG Lirong, SONG Chaojing. Review on freshwater lens of lime-sand island in Nanhai Zhudao[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(6): 601 – 610. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵焕庭, 王丽荣. 珊瑚礁岛屿淡水透镜体研究综述[J]. 热带地理, 2015, 35(1): 120 – 129. [ZHAO Huanting, WANG Lirong. Review on the study of freshwater lens in the coral reef island[J]. Tropical Geography, 2015, 35(1): 120 – 129. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 周从直, 方振东, 魏营. 珊瑚岛礁淡水透镜体的开发利用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2017. [ZHOU Congzhi, FANG Zhendong, WEI Ying. Development and utilization of freshwater lens of coral reef[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2017. (in Chinese)]
- [4] 盛冲, 张云帆, 李付成, 等. 钙质珊瑚砂水力参数测定与涵淡水能力模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 562 – 568. [SHENG Chong, ZHANG Yunfan, LI Fucheng, et al. Measurement of hydrological parameters of coral sand and freshwater storage capacity simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 562 – 568. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 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.
- [6] WHITE I, FALKLAND T. Management of freshwater lenses on small Pacific Islands[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(1): 227 – 246.
- [7] 韩冬梅, 曹国亮, 宋献方. 南海珊瑚礁人工岛淡水透镜体形成过程及影响因素[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1053 – 1064. [HAN Dongmei, CAO Guoliang, SONG Xianfang. Formation processes and influencing factors of freshwater lens in artificial island of coral reef in South China Sea[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1053 – 1064. (in Chinese with English abstract)]
- [8] BRYAN E, MEREDITH K T, BAKER A, et al. Island groundwater resources, impacts of abstraction and a drying climate: Rottnest Island, Western Australia[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 704 – 718.
- [9] POST V E A, HOUBEN G J. Density-driven vertical transport of saltwater through the freshwater lens on the island of Baltrum (Germany) following the 1962 storm flood[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 689 – 702.
- [10] 周从直, 方振东, 官举德, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体的模拟与开发利用[J]. 杭州应用工程技术学院学报, 1999, 11(增刊1): 16 – 20. [ZHOU Congzhi, FANG Zhendong, GUAN Jude, et al. Numerical simulation and development of the freshwater lens on a coral island[J]. Journal of Hangzhou Institute of Applied Engineering, 1999, 11(Sup 1): 16 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周从直, 方振东, 梁恒国, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体的数值模[J]. 海洋科学, 2004, 28(11): 77 – 80. [ZHOU Congzhi, FANG Zhendong, LIANG Hengguo, et al. Numerical simulation of freshwater lens on coral island[J]. Marine Sciences, 2004, 28(11): 77 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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 Congzhi, FANG Zhendong, LIANG Hengguo, et al. Influence of rainfall on freshwater lens in a coral island[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(1): 53 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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 Li, ZHOU Congzhi, SHU Longcang, 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 with English abstract)]
- [14] 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 Jun, WEN Zhonghui, SHU Longcang, 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 with English abstract)]
- [15] 周从直, 谯华, 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 Congzhi, QIAO Hua, DU Rong. Simulation and exploitation of the freshwater lens in coral island[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2016, 32(3): 1 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 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 – 55.
- [17] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 121 – 142.
- [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] 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 Chong, XU Hehua, ZHANG Wentao. 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 with English abstract)]
- [20] SHENG Chong, JIAO J J, XU Hehua, et al. Influence of land reclamation on fresh groundwater lenses in oceanic Islands: Laboratory and numerical validation[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(10): e2021WR030238.
- [21] LU Chunhui, CAO Hongfan, MA Jing, et al. A proof-of-concept study of using a less permeable slice along the shoreline to increase fresh groundwater storage of oceanic Islands: Analytical and experimental validation[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(8): 6450 – 6463.
- [22] 马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 等. 一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 1 – 7. [MA Jing, LU Chunhui, WU Jichun, et al. A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic Islands[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景. 南海珊瑚礁地貌模型研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(9): 112 – 120. [ZHAO Huanting, WANG Lirong, SONG Chaojing. Geomorphological model of coral reefs in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(9): 112 – 120. (in Chinese with English abstract)]
- [24] STOECKL L, HOUBEN G. Flow dynamics and age stratification of freshwater lenses: Experiments and modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 458/459: 9 – 15.
- [25] 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.
- [26] 薛禹群, 谢春红, 吴吉春, 等. 海水入侵咸淡水界面运移规律研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 1991. [XUE Yuqun, XIE Chunhong, WU Jichun, et al. Study on migration law of salt-fresh water interface[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1991. (in Chinese)]
- [27] 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 Congzhi, HE Li, YANG Qin, et al. Three-dimensional numerical simulation of freshwater len in coral Islands[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(5): 560 – 566. (in Chinese with English abstract)]
- [28] ABDOLHALIK A, AHMED A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: Experimental and numerical study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 199: 62 – 73.
- [29] LUYUN R J, MOMII K, NAKAGAWA K. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion[J]. *Ground Water*, 2011, 49(2): 239 – 249.
- [30] 沈建伟, 杨红强, 王月, 等. 西沙永兴岛珊瑚礁坪的群落动态和浅水碳酸盐沉积特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(3): 472 – 487. [SHEN Jianwei, YANG Hongqiang, WANG Yue, et al. Community dynamics and shallow water carbonate deposition characteristics of coral reef flat in Yongxing Island[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2014, 44(3): 472 – 487. (in Chinese with English abstract)]
- [31] VACHER H L. Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(4): 580 – 591.

编辑: 张若琳