

不透水面影响下海岛淡水透镜体的形成与演化

凌子涵^{1,2}, 束龙仓^{1,2}, 王 然^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 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)

摘要:以某海岛的水文地质资料为基础,对研究区水文地质条件进行概化,并使用 Visual MODFLOW 软件构建了该海岛淡水透镜体的二维模型,通过改变不透水面的覆盖范围,模拟透镜体形态及储水量的变化。数值模拟结果表明,初始状态下岛屿淡水透镜体的最大厚度约为 15.6 m;在设置不透水面后,淡水透镜体大约在 15a 之后再次达到稳定状态,设置不透水面一侧的淡水透镜体下界面轮廓向内凹陷,淡水透镜体的最大厚度减小至 14.6 m,岛屿地下淡水储量减少了 20.23%。对影响淡水透镜体的 4 种影响因素进行灵敏度分析,结果表明给水度对岛屿地下淡水储量影响最大,其后依次为降雨入渗补给系数、渗透系数和不透水面覆盖范围。

关键词:海岛;淡水透镜体;不透水面;灵敏度

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2022)01-0097-06

Formation and evolution of freshwater lens in an island under influence of impervious surface//LING Zihan^{1,2}, SHU Longcang^{1,2}, WANG Ran^{1,2}(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract:Based on the hydrogeological data of an island, the hydrogeological conditions of the study area were generalized, and the corresponding two-dimensional numerical model was established by using Visual MODFLOW. The formation and water storage capacity variation of the lens was simulated by changing the coverage area of the impervious surface. The simulation results show that the maximum thickness of the initial island freshwater lens is 15.6 m. After configuration of the impermeable surface, the freshwater lens is stable again after 15 years. The outline of the lens with impervious surface is concave inward, and the maximum thickness is reduced to 14.6 m, and the underground fresh water storage of the island is reduced by 20.23%. Sensitivity analysis of the four influencing factors of the fresh water lens shows that the aquifer specific yield has the greatest impact on the underground freshwater storage, and then follows the impact of precipitation infiltration intensity, permeability coefficient and impervious surface coverage.

Key words: island; freshwater lens; impervious surface; sensitivity

我国拥有丰富的海洋资源,海岛作为人类探索海洋的重要支点,对于开发海洋资源、建设海洋经济大国具有重要意义。本文所研究的海岛是西沙群岛中最大的灰沙岛屿,为三沙市政治、经济、文化中心,岛上常住人口 2500 多人^[1]。近年来随着三沙市对该海岛的大力建设,岛上现已具备良好的居住生活条件,但面临着用水形势严峻的问题,目前主要通过补给船定期补给以解决岛上居民的饮用水问题^[2],但这种方式运水,水量十分有限,且成本昂贵。除此之外还有海水淡化、雨水收集等方法,但均无法满足日趋增长的岛上用水需求。

海岛独特的地质结构使得岛屿地下淡水被咸水包围,并浮于咸水之上,被称作“淡水透镜体”。近年来国内外学者对淡水透镜体的形成、演变及影响因素等进行了深入研究^[3-7]。李国敏等^[8]对涠洲岛含水层条件进行概化,并建立数值模型,模拟了海水入侵的 3D 过程。Vacher^[9]利用 Ghyben-Herzberg 公式对 Bermuda 岛和 Great Exuma 岛淡水透镜体的形态进行了模拟计算。James 等^[10]使用 SEAWAT 软件,模拟海岸侵蚀对美国佛罗里达州海岛淡水透镜体形态与厚度的影响。甄黎等^[11]通过物理模型模拟了不同开采条件下倒锥的变化过程。本文在前人

研究的基础上,利用 Visual MODFLOW 软件构建了所研究海岛淡水透镜体的二维模型,并在透镜体稳定后设置不透水面,通过改变不透水面的覆盖范围,模拟透镜体形态及储水量的变化。此外,对影响透镜体储水量的不同因素进行灵敏度分析,为岛屿淡水资源开采提供科学参考。

1 研究区概况

本文所研究海岛为海南省三沙市永兴岛,朝海部分的岛屿经礁坪前缘以大角度进入深海盆地^[12],全岛在北回归线以南,纬度低,地处热带地区,属赤道带、热带海洋性季风气候,岛屿年平均气温在 26℃ 以上,年降雨量超过 1 400 mm,其中 6—11 月降水量占全年 85% 以上。

该海岛的地质结构大体上可以分为全新统和更新统,地表以下约 22 m 处为不整合面,不整合面以上为全新世珊瑚贝壳砂地层,淡水透镜体主要存在于该地层;不整合面以下由岩溶十分发育的更新世石灰岩构成,由于原生礁不断受到海水侵蚀,石灰岩体被孔隙通道贯通,岩溶发育,因此渗透性很强^[13]。钻孔资料及其他文献^[14-19]表明:岛屿地表以下 6 m 由素填土和珊瑚碎屑中砂组成,地表以下 6 ~ 22 m 由珊瑚碎屑砾和珊瑚碎屑砾砂组成,22 m 以下为珊瑚礁灰岩;岛屿介质孔隙度为 0.4,给水度为 0.2;含水介质纵向弥散度为 5 m,横纵比为 0.1。此外,该海岛淡水补给的主要来源是降雨入渗补给,排泄方式主要是垂向的蒸发排泄和侧向的向海洋排泄。

2 数值模型

2.1 水文地质概念模型

本文以研究区的水文地质条件为依据,建立二维模型观察淡水透镜体的形态变化。选取岛屿截面长度 1 980 m,模型的最大深度取到海平面以下 48 m,海平面以上岛屿高程设定为 5 m。将模拟区域地层整体分为 3 层:第一层为地表至地表以下 6 m,该层主要是填土及珊瑚碎屑;第二层为地表以下 6 ~ 22 m,为全新世地层;地表以下 22 ~ 54 m 为更新世地层。参照该海岛的地理特性及文献^[20],3 层地层结构渗透系数 k 的初始值分别取 60 m/d、150 m/d、1 000 m/d。

海岛淡水透镜体的补给来源为降雨补给。Ghassemi 等^[21]根据统计资料对 Home 岛淡水透镜体进行三维数值模拟时,降雨入渗补给系数取 0.44;周从直等^[22]对永兴岛淡水透镜体进行三维数值建模时,取多年平均降雨的 40% 作为补给量。本文结合之前学者的经验,考虑该海岛的水文气象条件,降雨入渗补给系数取 0.4。模型其他参数设置如

下:淡水密度为 1 g/cm³,海水密度为 1.025 g/cm³,海水质量浓度为 0.019 g/cm³,弹性贮水率为 10⁻⁵ m⁻¹。模型顶部接受大气降雨补给且存在蒸发,设定为流量边界;补给浓度取雨水中氯离子质量浓度,近似为 0 g/cm³;模型底部含水层与海水连通,不存在水量交换,因此可视为零流量边界^[22]。模型侧向边界在海平面以上部分质量浓度为 0 g/cm³,在海平面以下的部分被海水包围,故取海水的氯离子质量浓度,即 0.019 g/cm³。模型初始水头取 0 m,概化后模型示意图如图 1 所示。

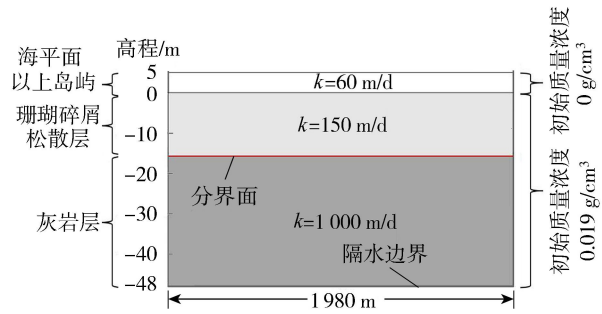


图 1 水文地质模型

2.2 数学模型

由于海水与淡水可以混溶,因此所构建海岛淡水透镜体二维剖面模型存在可混溶液体间的水动力弥散问题^[23]。数学模型由控制方程、初始条件以及边界条件构成,依据上述水文地质概念模型,建立研究区地下水流与溶质运移数学模型,通过以下微分方程的定解问题来描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_1 (H - B) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_1 (H - B) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + W_1 = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, z, t) \big|_{t=0} = H_0 \quad ((x, z) \in D) \\ H(x, z, t) \big|_{\Gamma_1} = H_1 \quad ((x, z) \in \Gamma_1, t > 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_1 为潜水含水层渗透系数; μ 为潜水含水层给水度; H 为潜水位; B 为潜水含水层底板标高; W_1 为源汇项; H_0 为初始水位; H_1 为研究区一类边界点的水位; x, z 为坐标; D 为计算区范围; Γ_1 为研究区一类边界; t 为时间。

多孔介质的溶质运移方程包括水动力弥散项、地下水对流项、源汇项以及反应项。溶质运移方程为

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\theta v_i C) + \rho_s q_s + \sum R_n \quad (2)$$

式中: θ 为有效孔隙度; C 为溶质质量浓度; q_s 为单位时间内进入单位体积含水层的源汇项体积; ρ_s 为源汇项溶质质量浓度; D_{ij} 为水动力弥散系数($i, j = 1, 2, 3$); v_i 为流体速度; $\sum R_n$ 为化学物质反应项。

2.3 模型离散化

将研究区域划分为若干个网格单元(共 30 层 34 列),每个网格单元内部的水文参数为常数,单元之间存在水力联系,将分界面以上部分及侧向边界网格进行加密处理。模型模拟期为 73 050 d,水头计算初始时间步长为 0.001 d。溶质运移计算初始时间步长 1 d,增长因子为 2,最大时间步长为 10 d,模型结果以月为单位输出。

3 模型模拟结果与分析

3.1 淡水透镜体模拟结果

在 Visual MODFLOW 软件中,根据实际逐月降雨资料与逐月蒸发资料设定模型源汇项,模拟期为 100 a,选用 SEAWAT 程序包进行模拟,其中水流计算采用预处理共轭梯度法 (PCG) 来求解;对流计算采用中心差分法^[24]。运行结果以氯离子 600 mg/cm³ 质量浓度等值线^[21]为淡水透镜体下界面轮廓即咸淡水界面。

模型运行结果如图 2 所示,随着降雨入渗的不断补给,淡水透镜体厚度变大,在 50 a 后形状达到稳定,稳定时透镜体最大厚度约为 15.6 m。图 3 为岛屿地下水流流速示意图,箭头的大小表示流速的快慢,可以看出,降雨入渗的水流由上至下流动,并向两侧排泄;透镜体内部中心水流流速很低,由于咸淡水之间存在密度差,使得淡水透镜体中心部分淡水受浮力较大,因此透镜体下界面轮廓中心部分向上凸起。

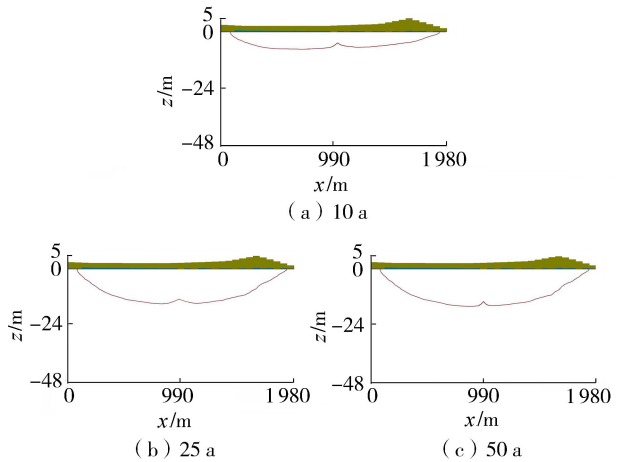


图 2 淡水透镜体形态演变过程

该岛屿淡水透镜体最大厚度随时间的变化如图 4 所示,可以看出透镜体形成初期(0 ~ 10 a)厚度增加速度逐渐加快,到中期(10 ~ 40 a)速度逐渐下降,40 a 后透镜体厚度变化十分微小直至不变化。如图 5 所示,透镜体潜水面呈向上凸起的形状,中间厚、两侧薄,中间水头最大超过 0.33 m,边缘水头最小为 0 m,水头向四周递减形成水力坡降,可以保证淡

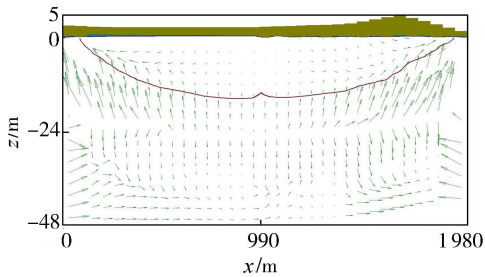


图 3 岛屿地下水水流速

水从透镜体最厚的地方不断排泄入海。

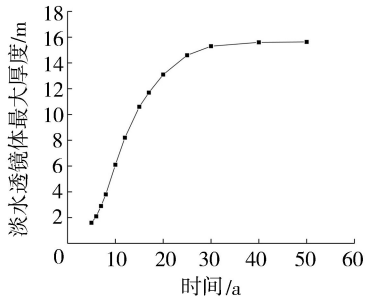


图 4 淡水透镜体最大厚度随时间变化

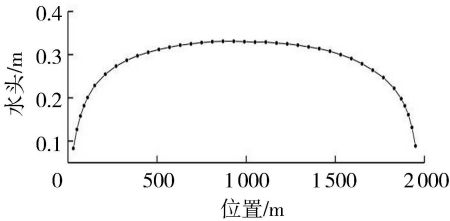


图 5 淡水透镜体潜水面形状

3.2 不透水面对透镜体的影响

岛屿城市化过程中土地利用不断加大,海水入侵现象更加明显,岛屿淡水储量会随之减少。为探究不透水面对淡水透镜体的影响,在模型 0 ~ 594 m 部分将降雨入渗补给系数设置为 0.01,将该部分界面作为不透水面^[25],蒸发量设为 0,将原始岛屿模拟的水头及质量浓度结果作为初始条件输入模型中,模型大约经过 15 a 后再次达到稳定,模拟结果如图 6 所示,可以看出设置了不透水面一侧的岛屿,由于降雨入渗补给的减少,淡水透镜体向岛屿

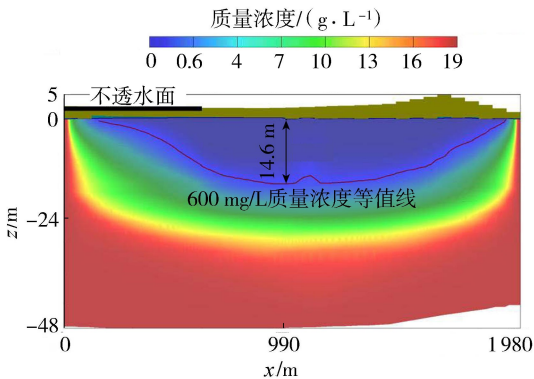


图 6 设置不透水面后透镜体形态

内部凹陷,淡水透镜体的最大厚度减小至 14.6 m,且淡水透镜体厚度整体上变薄,经计算稳定时岛屿地下淡水储量为 3 408 m³/m,相比初始时减少了 20.23%。

图 7 为设置不透水面前后海岛内部水流的流向,由图 7 可知,未设置不透水面的岛屿降雨入渗补给的水流到达透镜体形状边缘时,部分水流继续向下流动,部分水流水平流动,还有一些水流有向上的速度分量;在设置不透水面后,不透水面的存在阻碍了局部的降雨入渗补给,在不透水面存在的一侧,水流多为横向流动,向下流动路径缩短,并在岛屿侧边向海洋排泄,因此透镜体轮廓向内凹陷,淡水储量也相应减少。在岛屿开发过程中,随着建设力度的增大,岛屿土地覆盖中不透水面占比会随之增加,因此在模型中设置了多种不透水面覆盖范围,以分析淡水透镜体的形态及储量变化规律。结果表明,随着不透水面覆盖范围的增大,存在不透水面一侧的淡水透镜体向内萎缩趋势愈加明显,体积不断减小,淡水透镜体最大厚度位置也在逐渐右移。

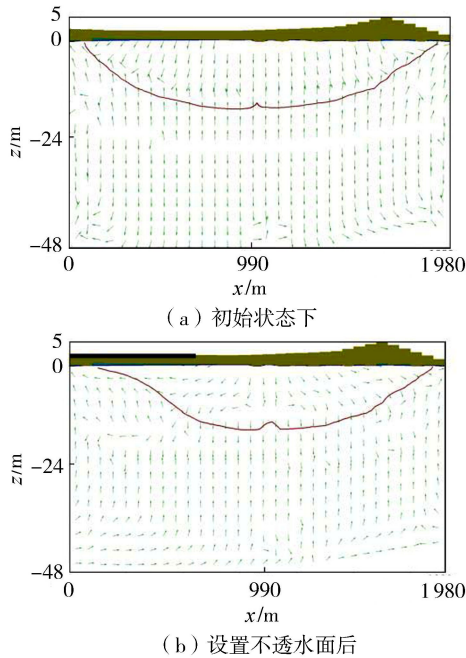


图 7 海岛内部地下水流向

图 8 展示了不同不透水面覆盖范围占比下岛屿单宽地下淡水储量的变化,随着不透水面覆盖范围占比的不断加大,地下淡水储量逐渐减少,且减少速度逐渐加快,当不透水面覆盖范围占比超过 40% 后,二者逐渐转变为线性关系。同时可以看出,当不透水面覆盖范围占比超过岛屿总长度的 50% 时,地下淡水储量减少至原来的 50% 左右;当不透水面覆盖范围占比为 60% 时,地下淡水储量已经不足原储量的 40%。

3.3 模型灵敏度分析

本文采用扰动分析法中的 Morris 法作为灵敏度

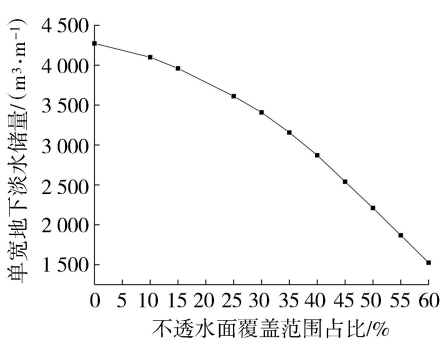


图 8 岛屿地下淡水储量随不透水面覆盖范围占比变化计算方法,表示参数变化对模拟结果影响程度的灵敏度 S 的计算公式^[26]为

$$S = \frac{y_i - y_0}{y_0 \Delta_i} \tag{3}$$

其中

$$\Delta_i = \frac{P_i - P_0}{P_0}$$

式中: y_i 为参数变化后模型输出值; y_0 为模型原始输出值; P_0 为参数初始值; P_i 为参数变化后的值; Δ_i 为 P_i 相对于 P_0 的变化幅度。

影响海岛淡水透镜体形态及体积的因素有很多,可以分为自然因素和人为因素,自然因素包括降雨入渗补给、蒸发和岛屿介质渗透性等,人为因素主要是不透面对透镜体的影响。为了研究该海岛地下淡水储量在不同影响因素变化下的敏感程度,本文对 4 项主要影响因素进行灵敏度分析,采用局部灵敏度分析方法,研究单一影响因素变化时对淡水透镜体体积(文中指地下淡水储量)的影响。依次选用不透水面覆盖范围、含水层给水度、降雨入渗补给系数和渗透系数进行灵敏度计算。

以上 4 种参数初始值设置如下:不透水面覆盖范围 594 m;含水层给水度 0.2;降雨入渗补给系数 0.4;3 层地层结构渗透系数分别为 60 m/d、150 m/d 和 1 000 m/d。为了便于计算,参数变化幅度取 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 和 $\pm 30\%$,灵敏度计算及分析结果见图 9。

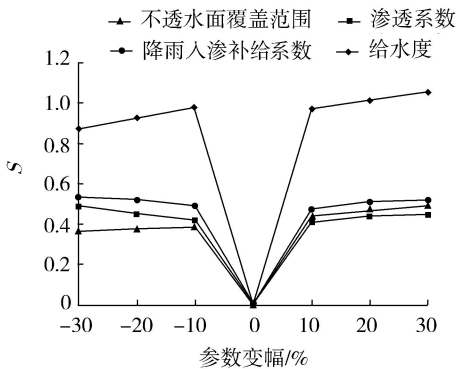


图 9 参数的灵敏度分析

从灵敏度的计算结果可以得到:随着不透水面覆盖范围或渗透系数的增大,海岛地下淡水储量随

之减少;当降雨入渗补给系数或给水度增大时,海岛地下淡水储量也随之增加。岛屿地下淡水储量对于给水度的变化最为敏感,其次是降雨入渗补给系数和岛屿介质渗透系数,再次是不透水面覆盖范围。降雨入渗补给系数和渗透系数的灵敏度在初始值对称增减时呈对称分布,且随变幅的增大灵敏度也随之增大。给水度和不透水面覆盖范围灵敏度随着其自身的增大而增大。

4 结 论

- a. 对研究岛屿进行水文地质概化,建立数值模型,模型运行期 0 ~ 10 a 透镜体厚度增长较快,10 ~ 40 a 增长速度放缓,经过大约 50 a 达到稳定,模拟结果显示岛屿地下淡水透镜体最大厚度约为 15.6 m,透镜体潜水面形状中间厚、两边薄。
- b. 在岛屿长度 0 ~ 594 m 部分设置不透水面,模型经过 15a 后重新达到稳定,淡水透镜体整体上变薄,最大厚度减小至 14.6 m,设置了不透水面一侧的透镜体下界面向内凹陷,岛屿地下淡水储量为 3 408 m³/m,相比初始岛屿减少了 20.23%。
- c. 灵敏度分析结果表明,岛屿地下淡水储量对于给水度最为灵敏,其次是降雨入渗补给系数、含水层渗透系数和不透水面覆盖范围,其中不透水面覆盖范围和渗透系数与岛屿地下淡水储量呈负相关关系,降雨入渗补给系数和给水度与岛屿地下淡水储量呈正相关关系。

参考文献:

[1] 盛冲,许鹤华,张文涛.地貌变化对研究海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))

[2] 邢思初.三沙市研究海岛海水淡化厂工程设计[J].给水排水,2019,55(3):17-19. (XING Sichu. Design of island in Sansha City for seawater desalination water treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019,55(3):17-19. (in Chinese))

[3] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: American Elsevier,1972:764-766.

[4] FETTER C W Jr. Groundwater hydraulics of extensive aquifers[R]. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement,1972.

[5] BUDD D, VACHER H L. Predicting the thickness of freshwater lenses in carbonate paleo-islands[J]. J Sed Petrol,1991,61(1):43-53.

[6] OBERDOFER J A,BUDDEMEIER R W. Climate change: effects on reef island resources[C]// Sixth Internet Coral Reef Symposium (3). Townsville, Australia: [s. n.], 1988:523-527.

[7] BOKUNIEWICZ H, PAVLIK B. Groundwater seepage along a barrier island[J]. Biogeochemistry,1990,10:257-276.

[8] 李国敏,陈崇希,蒋同根. 涠洲岛海水入侵[J]. 水文地质工程地质,1995,22(5):1-5. (LI Guomin, CHEN Chongxi,JIANG Tonggen. The sea intrusion of Weizhou Island[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,1995,22(5):1-5. (in Chinese))

[9] VACHER H L. Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses[J]. Geological Society,1988,100:580-591.

[10] JAMES C S,SARAH E K. Assessing selected natural and anthropogenic impacts on freshwater lens morphology on small barrier islands: Dog Island and St. George Island, Florida, USA [J]. Hydrogeology Journal, 2005, 14: 131-145.

[11] 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))

[12] SHEN J W, YANG H Q, WANG Y, et al. Coral community dynamics and shallow-water carbonate deposition of the reef-flat around Yongxing Island, the Xisha Islands[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 1471-1486.

[13] 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))

[14] 陈万利,吴时国,黄晓霞,等.西沙群岛晚第四纪碳酸盐岩淡水成岩作用:来自永兴岛 SSZK1 钻孔的地球化学响应证据[J]. 沉积学报,2020,38(6):176-192. (CHEN WanLi, WU Shiguo, HUANG Xiaoxia, et al. Geochemical signatures in the late quaternary meteoric diagenetic carbonate succession, Xisha Islands, South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38 (6) : 176-192. (in Chinese))

[15] 秦国权. 西沙群岛“西永一井”有孔虫组合及该群岛珊瑚礁成因初探[J]. 热带海洋,1987,6(3):10-17. (QIN Guoquan. A preliminary study on foraminiferal assemblages of well 1 Xiyong, Xisha Islands and their coral reef formation [J]. Tropical Oceanology, 1987, 6 (3):10-17. (in Chinese))

[16] 王国忠,吕炳全,全松青. 永兴岛珊瑚礁的沉积环境和

- 沉积特征[J]. 海洋与湖沼,1986(1):36-44. (WANG Guozhong, LU Binqun, QUAN Songqing. The sedimentary environments and characteristics of the coral reef of the yongxing island[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1986(1):36-44. (in Chinese))
 - [17] 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))
 - [18] 束龙仓,周从直,甄黎,等. 珊瑚砂含水介质水理性质的实验室测定[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(3):330-332. (SHU Longcang, ZHOU Congzhi, ZHEN Li, et al. Measurement of the hydrological properties of coral sand in a laboratory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(3): 330-332. (in Chinese))
 - [19] 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))
 - [20] FALKLAND A C. Climate, hydrology and water resources of the Cocos (Keeling) Island [M]. Washington D. C: National museum of Natural History Smithsonian Institution,1994:21-22.
 - [21] GHASSEMI F, MOLSON J W, FALKLAND A, et al. Three-dimensional simulation of the Home Island freshwater lens: preliminary results [J]. Environmental Modelling and Software,1998,14(2-3):181-190.
 - [22] 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))
 - [23] 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,1991:43-47.
 - [24] GUO W, LANGEVIN C D. User's guide to SEAWAT: a computer program for the simulation of three dimensional variable-density ground-water flow [R]. Virginia: U S Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations,2002.
 - [25] 张施跃,束龙仓,闵星,等. 基于土地利用类型的大气降水入渗补给量计算[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2017,47(3):860-867. (ZHANG Shiyue, SHU Longcang, MIN Xing, et al. Calculation of precipitation infiltration recharge based on land-use type [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(3): 860-867. (in Chinese))
 - [26] 鲁程鹏,束龙仓,刘丽红,等. 基于灵敏度分析的地下水数值模拟精度适应性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):26-30. (LU Chengpeng, SHU Longcang, LIU Lihon, et al. Adaptability evaluation of numerical simulation accuracy of groundwater based on sensitivity analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(1):26-30. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-12-11 编辑:骆超)
- +++++
- (上接第90页)
- [14] 邓成进,党发宁,陈兴周. 库区滑坡涌浪传播及其与大坝相互作用机理研究[J]. 水利学报,2019,50(7):815-823. (DENG Chengjin, DANG Faning, CHEN Xingzhou. Study on the surge wave propagation in the reservoir area and its interaction mechanism with the dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(7): 815-823. (in Chinese))
 - [15] 郑国兵,黄朝煊,袁文喜,等. 深厚淤泥中双排钢板桩结构安全稳定性研究[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):71-76. (ZHENG Guobing, HUANG Chaoxuan, YUAN Wenxi, et al. Research of safety and stability of double-row steel sheet pile structure in deep silt [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(4):71-76. (in Chinese))
 - [16] 刘春阳,张淑华,陈光明,等. 基于 ANSYS 的双排钢板桩海堤受力特性分析[J]. 华东交通大学学报,2016,33(2):106-113. (LIU Chunyang, ZHANG Shuhua, CHEN Guangming, et al. Analysis of mechanical characteristics of double-row steel sheet pile seawalls based on ANSYS [J]. Journal of East China Jiao Tong University, 2016, 33(2):106-113. (in Chinese))
 - [17] MITOBE Y, ADITYAWAN M B, ROH M, et al. Experimental study on embankment reinforcement by steel sheet pile structure against tsunami overflow [J]. Coastal Engineering Journal,2016,58(4):164-182.
 - [18] 高加云,顾倩燕,李小军. 软土地基大跨度双排钢板桩围堰结构稳定性研究[J]. 水运工程,2009(8):50-55. (GAO Jiayun, GU Qianyan, LI Xiaojun. Stability analysis of large-span double sheet-piled cofferdam on soft ground [J]. Port & Waterway Engineering, 2009(8):50-55. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-12-13 编辑:骆超)