

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.06.011

钙质珊瑚砂水理参数测定与涵淡水能力模拟

盛冲^{1,2,3},张云帆^{1,2,3},李付成^{1,2,3},许鹤华^{1,2,3}

- (1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室(南海海洋研究所),广东 广州 510301;
2. 中国科学院南海生态环境工程创新研究院,广东 广州 510301;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东 广州 511458)

摘要:采用常规方法对我国南海某岛4个站位的钙质珊瑚砂样品进行实验室测定,并在此基础上利用模拟软件FEMWATER进行涵淡水能力的数值模拟。结果显示:南海表层钙质珊瑚砂以中细粒为主,其孔隙度在0.35~0.51之间,而渗透系数和给水度区域间差异较大,通常在0.023~12.73 m/d和0.01~0.10之间;岛礁淡水透镜体的厚度和资源储量与钙质珊瑚砂的水理参数间存在着密切联系,相比于其他参数,给水度对岛礁淡水透镜体的资源储量影响最大;与西沙群岛的钙质珊瑚砂相比,所测定的钙质珊瑚砂的粒度更细且颗粒多呈片状,磨圆度较差,反映了两者间的水动力条件和造礁生物方面的差异。

关键词:钙质珊瑚砂;弥散系数;淡水透镜体;FEMWATER;涵淡水能力

中图分类号:TU122 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)06-0562-07

Measurement of hydrological parameters of coral sand and
freshwater storage capacity simulation

SHENG Chong^{1,2,3}, ZHANG Yunfan^{1,2,3}, LI Fucheng^{1,2,3}, XU hehua^{1,2,3}

- (1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of
Oceanology, Guangzhou 510301, China;
2. Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of
Sciences, Guangzhou 510301, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China)

Abstract: In this study, calcareous coral sand samples from four stations on an island in the South China Sea were measured by common methods. Based on test parameters, numerical simulations of freshwater storage capacity were conducted by FEMWATER. The result indicates that the surface of the dredged calcareous coral sand in the South China Sea is mainly composed of medium and fine grains, and the porosity is mostly between 0.35 and 0.51. Meanwhile, the permeability coefficient and specific yield vary widely in different place, from 0.023–12.73 m/d and 0.01–0.10, respectively. There is a close relationship between the thickness and resource storage of fresh water lens and the hydrological parameters of calcareous coral sand. Among these parameters, the specific yield has the greatest influence on the resource storage of freshwater lens on the coral islands. Compared with the natural calcareous coral sand of Xisha Islands, the calcareous coral sand of this study is finer in size and particles are mostly flaky with poor roundness, which reflects the differences in hydrodynamic conditions and reef-building organisms.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA13010303,XDA13020405); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0104)

作者简介: 盛冲(1994—),男,硕士研究生,主要从事水文地质及地下水数值模拟。E-mail:shengchong17@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 张云帆,副研究员。E-mail:Geozyf@163.com

引用本文: 盛冲,张云帆,李付成,等. 钙质珊瑚砂水理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.

Key words: calcareous coral sand; dispersion coefficient; freshwater lens; FEMWATER; freshwater storage capacity

珊瑚岛礁以其独特的战略地位、丰富的油气资源及生物资源在国家经济发展、资源开发和国防建设中占有重要地位。珊瑚礁在岩石学中统称为礁灰岩,是造礁石珊瑚群体死亡后的遗骸经漫长的物理化学和生物化学作用形成的特殊沉积物,而钙质珊瑚砂主要由珊瑚礁碎屑、海藻、贝壳等海洋生物残骸组成,其碳酸钙含量超过 90%,具有疏松多孔、易破碎、易压缩、渗透性强等特征^[1]。随着珊瑚礁海域的石油开发、填海工程与淡水资源开采等建设需要,钙质珊瑚砂带来的岩土工程问题层出不穷,人们逐渐认识到研究钙质珊瑚砂这种特殊岩土介质的重要性,继而对钙质珊瑚砂的物理力学性质和工程应用等有了更深的研究。此外对天然灰沙岛的调查研究发现,在珊瑚岛礁特殊的地质、地形及植被空间格局和充沛的降雨-径流量下,地下水经过一段时间的淡化,可以形成赋存于岛礁之内、悬浮于海水之上的淡水透镜体,这部分淡水资源对岛礁生态系统的维护至关重要。岛礁地下淡化水体的形成通常受到珊瑚砂的水理性质,包括透水性、容水性和给水性的影响,主要可用所形成的淡水透镜体的厚度和储量来衡量。我国钙质珊瑚砂的研究始于 20 世纪 70 年代中期,多采用分析珊瑚礁地质、地貌,原位和室内试验的方法测试钙质珊瑚砂基本物理力学性质^[2]。本文采集了我国南海某吹填海岛 4 个站位的松散钙质珊瑚砂样品,取样位置分别离吹填泵口由近至远,代表了吹填珊瑚砂不同位置的典型颗粒特征,深度 0~4 m,共 50 kg,采用常规方法保存,通过室内试验测定了样品的容水性、透水性、给水度、弥散系数等物理参数,并在此基础上利用地下水三维有限元模拟软件 FEMWATER,分析了不同砂样中所形成的淡水透镜体的差异。研究结果可为岛礁建设、填海造陆、开采岛礁淡水资源等提供参考。

1 钙质珊瑚砂水理参数的实验室测定

1.1 颗粒分析

为了明确钙质珊瑚砂的颗粒级配情况,概略判断其水理性质,首先对样品开展了颗粒分析试验。相关参数的测试工作由河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室束龙仓等^[3]完成。4 组砂样中 A 样品颗粒较粗,粒径 2 mm 以上的部分占 43.74% 以上,据 SL237—1999《土工试验规程》的要求^[4],选择筛析法对 A 进行筛分,B、C、D 组砂样由于颗粒较细,2 mm 以下的部分占 95% 以上,选用 LS13-320 激光粒度仪进行颗粒分析,具体的颗粒级配曲线如图 1 所示。此外为了方便不同砂样参数之间的比较,在粒度特征的基础上,结合 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》^[5]中土的分类标准分别对以上砂样进行了分类,结果见表 1。

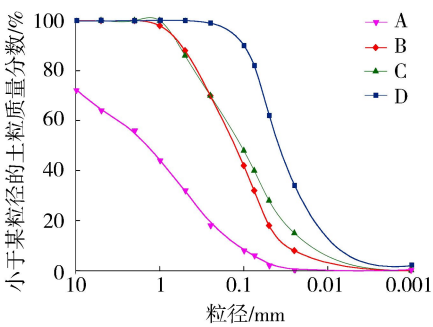


图 1 钙质珊瑚砂的颗粒级配曲线
Fig.1 Grain size curves of calcareous coral sand

表 1 珊瑚砂特征粒径和孔隙度

Table 1 Characteristic particle size and porosity of coral sand

砂样组号	粒径/ μm				不均匀系数	曲率系数	土样分类	孔隙度
	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}				
A	133.90	445.20	1 463.00	3 782.00	28.24	0.39	砾砂	0.37
B	5.09	23.41	37.42	44.82	8.80	2.40	粉土	0.40
C	40.31	85.18	151.3	208.20	5.62	0.86	粉砂	0.51
D	16.60	45.76	95.73	145.90	8.79	0.86	粉砂	0.44

1.2 容水性

容水性是指在常压下岩土空隙中能够容纳若干水量的性能^[3],通常用孔隙度表示,即岩土体孔隙的体积与岩土体总体积的比值。对于钙质珊瑚砂而言,孔隙度不仅影响其连通状况,而且反映了介质松紧度和结构状况的好坏。选用定义法测定孔隙度,量取一定体积的土样并压实,让其充分饱和。测量饱和土样的重量,烘干后再次称重,两者前后质量之差为损失的水分重量,通过水的质量求出体积,该体积为孔隙体积。结果显示 4 个样品的孔隙度在 0.37~0.51 之间(表 1),与相同粒径范围的陆源砂相比,其容水性较好,反映了钙质珊瑚砂多孔隙且颗粒棱角度高的特征。

1.3 透水性

渗透系数(K)是表征岩土透水性的定量指标^[3],在计算岛礁地下水资源量、淡水透镜体的演变规律等都要用到渗透系数。测定渗透系数的室内试验根据介质颗粒的粗细程度,分为变水头和常水头试验2种;对于透水性较低的粉土、黏性土一般采用变水头试验;砂土和碎石土则多用常水头试验。本次试验中的4组砂样,A、C组采用常水头试验方法,B、D组采用变水头试验方法,利用TST-55渗透仪测得。

在试验过程中,因珊瑚砂的特殊岩性结构(颗粒大小相差悬殊,形状不规则且表面多孔)以及装样的不均匀性,所测得渗透系数值相差较大。故进行多组、多次渗透试验,并延长观测时间来掌握其渗透系数的变化规律。试验过程中每种砂样设置了3组平行样,每组测量6次,各组的观测期不同,以测得每组的渗透系数值趋于稳定为止。各组砂样的渗透系数如表2所示,除样品A渗透系数较大以外,其余3组样品的渗透系数都在1 m/d以下,透水性相对较差。

1.4 给水性

给水度是表征潜水含水层给水能力和储蓄水能力的指标,在数值上等于单位面积的潜水含水层柱体,当潜水位下降一个单位深度时,在重力作用下自由排出水的体积和相应的潜水含水层体积的比值^[3]。根据给水度的定义及筒测法的操作规则,在前面所进行的渗透试验的基础上可以测得珊瑚砂的给水度。因每组的渗透系数不同,其给水度也略有差异。为不影响试验结果,给水度仅在每组试验结束后才得以观测,各组给水度值见表3。除了样品A的给水度稍大一些为0.1030,其余3组砂样的给水度都在0.0119~0.0300之间,与同粒径范围的陆源砂相比,给水度偏小。钙质珊瑚砂的表面有许多的坑洼处,且内孔隙发育,由于底部不连通,在重力作用下并不能完全疏水,另一方面这些坑洼处增加了颗粒的比表面积,使得钙质砂的持水能力变大,从而导致钙质珊瑚砂的给水度偏低。

除了样品A的给水度稍大一些为0.1030,其余3组砂样的给水度都在0.0119~0.0300之间,与同粒径范围的陆源砂相比,给水度偏小。钙质珊瑚砂的表面有许多的坑洼处,且内孔隙发育,由于底部不连通,在重力作用下并不能完全疏水,另一方面这些坑洼处增加了颗粒的比表面积,使得钙质砂的持水能力变大,从而导致钙质珊瑚砂的给水度偏低。

1.5 弥散系数

多孔介质中的对流弥散和分子扩散之和称为水动力弥散系数,它是描述咸淡水之间混合弥散作用的重要参数。一般来说,海水和淡水很容易混合,它们之间的接触带通常由于水动力弥散形成一个由咸水、高矿化度水逐渐变为淡水的过渡带。为了能准确获得珊瑚砂的弥散系数,采用一维连续注入示踪剂的弥散试验方法对现有珊瑚砂的弥散系数进行测定。

试验采用高55 cm,内径为10 cm的圆柱形砂柱,砂柱顶部2 cm处有一直径为3 mm的溢流孔,侧壁布设间距为10 cm测压管,同时以相同的间距在另外一侧设置了4个孔径为3 mm的取样孔,而在距砂柱底部2 cm处设有滤网且砂柱底端中心处留有出流孔(图2)。由上向下逐渐供水,直至形成一维稳定流,切断水流,记录下初始时间,此后由蠕动泵连续提供 $\rho_0(\text{NaCl})=18\text{ g/L}$ 的氯化钠溶液示踪,每隔一段时间记录下底部的浓度值 $\rho(\text{NaCl})$,具体砂柱底部浓度-时间曲线如图3所示。在此曲线的基础上基于近似一维弥散方程可求出不同砂样的纵向弥散系数 D_L ,由于篇幅所限,此处具体方程不再赘述,而纵向弥散度 $a_L=D_L/v$,其中 v 为圆筒中水流的平均流速,可通过单位时间的流量除以断面面积与孔隙度乘积得到^[6],具体见表3。

表2 各组珊瑚砂样的渗透系数

Table 2 Permeability coefficient of each group of calcareous coral sand

砂样组号	m/d			平均值
	组次1	组次2	组次3	
A	11.030	13.120	14.030	12.730
B	0.010	0.040	0.020	0.023
C	0.910	0.850	0.970	0.910
D	0.640	0.630	0.640	0.640

表3 各组砂样的给水度和弥散系数值

Table 3 Dispersion coefficient values and specific yield of each group of calcareous coral sand

砂样组号	给水度	纵向弥散系数/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	水流平均流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	纵向 弥散度/cm
A	0.1030	0.16420	0.01460	11.250
B	0.0300	0.00010	0.10000	0.001
C	0.0184	0.00884	0.00139	6.356
D	0.0119	0.01368	0.00020	69.420

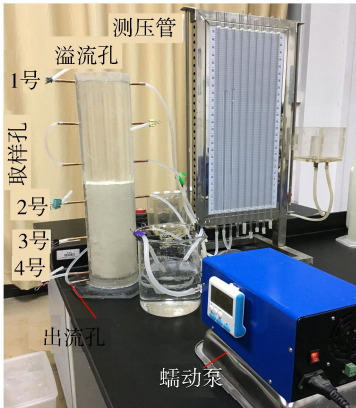


图2 室内一维弥散试验砂柱

Fig. 2 One-dimensional sand column in indoor dispersion test

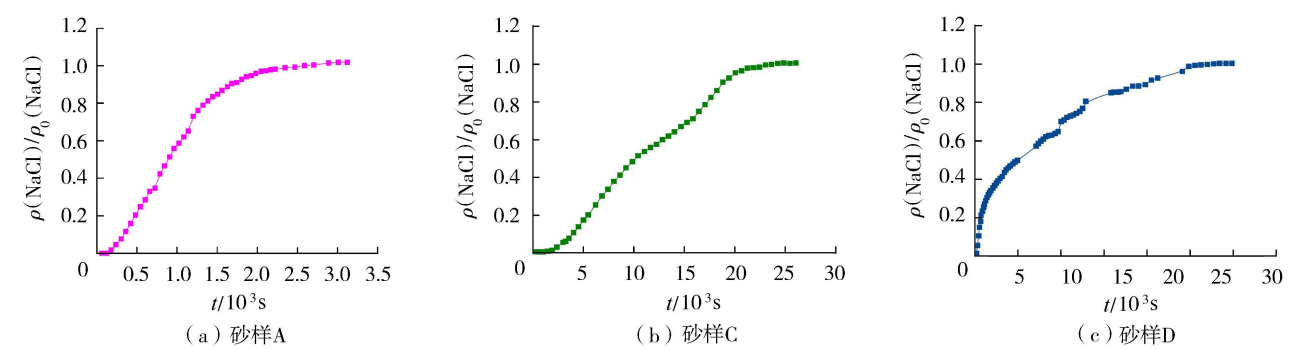


图 3 A、C、D 珊瑚砂柱底部 NaCl 溶液浓度-时间变化曲线

Fig.3 Concentration-time curve of NaCl solution at the bottom of coral sand columns A, C and D

2 钙质珊瑚砂涵淡水能力的数值模拟

虽然本文测试的主要为表层(0~4 m)吹填珊瑚砂样的水力性质参数,但其对岛礁地下淡水透镜体的形成具有重要意义。主要体现在 3 个方面:(a)岛礁这部分地下淡水体的形成的淡水来源主要来自大气降水,上部的吹填珊瑚砂会影响地下水的入渗补给情况;(b)由于南海吹填岛礁多是在原有的礁坪基础上进行吹填完成,在岛上有些区域这部分吹填珊瑚砂的厚度可达 8~10 m(如:永暑礁),而这一厚度也是岛礁地下淡水透镜体的主要赋存厚度;(c)南海诸多珊瑚岛礁的地下水的埋深水位较浅,多在 1~2.5 m 左右,岛礁地下淡水透镜体的上部或者某些较薄的淡水透镜体主要还是赋存在这部分吹填珊瑚砂之中。因此对其进行数值模拟研究十分有必要。

2.1 模拟方法

为了综合判断钙质珊瑚砂水文地质参数对岛礁地下淡水透镜体的形成影响,在上述试验参数的基础上,结合数值方法,探究不同砂样条件下岛礁淡水透镜体的形成差异。利用国际上比较有影响的地下水三维有限元模拟系统 FEMWATER 进行求解,该软件由美国宾州大学的 Yeh 教授所开发的 2 个模型 3DFEMWATER(水流)和 3DLEWASTE(溶质运移)合并而成,可用来模拟饱和与非饱和带中的三维地下水流和溶质运移问题,以及咸水入侵等变密度条件下的地下水流和溶质运移问题^[7]。目前 FEMWATER 已作为一个重要的模块集成在了 GMS 中,其理论结构完整,数值方法成熟,具有强大的边界离散和潜水面识别功能,已引起了国内相关学者的注意^[8]。

一方面由于部分水力参数存在尺度效应,如弥散系数^[9-10](图 4),且钙质珊瑚砂的渗透系数较小,为了能够使模型尺度更好地系统模拟上述参数,参考岛礁的实际地形地貌,根据相似性原理,构建了一个三维有限元的概念模型,如图 5 所示。模型水平方向直径长 100 m,其中海岛区域的直径 60 m,四周被礁坪环绕;z 方向模型总高为 52 m,其中海岛部分高出海平面 2 m。模型有效单元网格共计 82 470 个,其中海岛区域顶部为定流量边界,以模拟实际的大气降雨情况(图 5),补给量为 0.03 m/d 的淡水;模型四周及礁坪上部为定水头与定浓度边界,以模拟海水边界,其中水头值取平均海平面的高度 0 m,浓度值则取海水中氯离子浓度

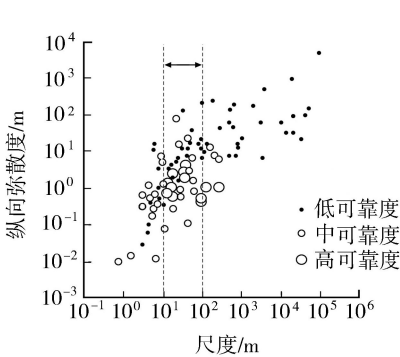


图 4 纵向弥散度随尺度的变化

Fig.4 Longitudinal dispersion varies with model scale

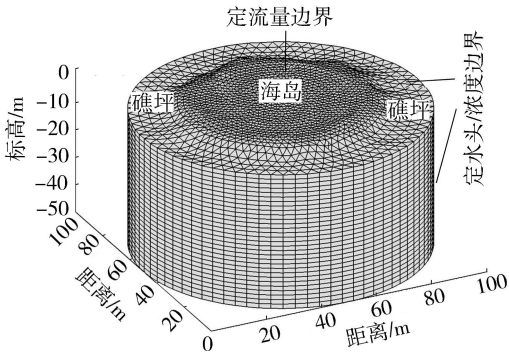


图 5 三维有限元网格及边界条件

Fig.5 3-D finite element mesh and boundary conditions

19 g/L^[11]。FEMWATER 数值模拟海岛淡水透镜体的模拟时间为 12 000 d,时间步长 30 d。

2.2 模拟结果分析

在前文室内试验所测得的水文地质参数的基础上,利用 FEMWATER 分别对上述 4 组钙质珊瑚砂样进行模拟,其中由于 B 组砂样过细,且渗透系数仅为 0.023 m/d,难以进行准确模拟,因此只取得了 A、C、D 这 3 组模拟结果,具体模拟结果如图 6 所示。

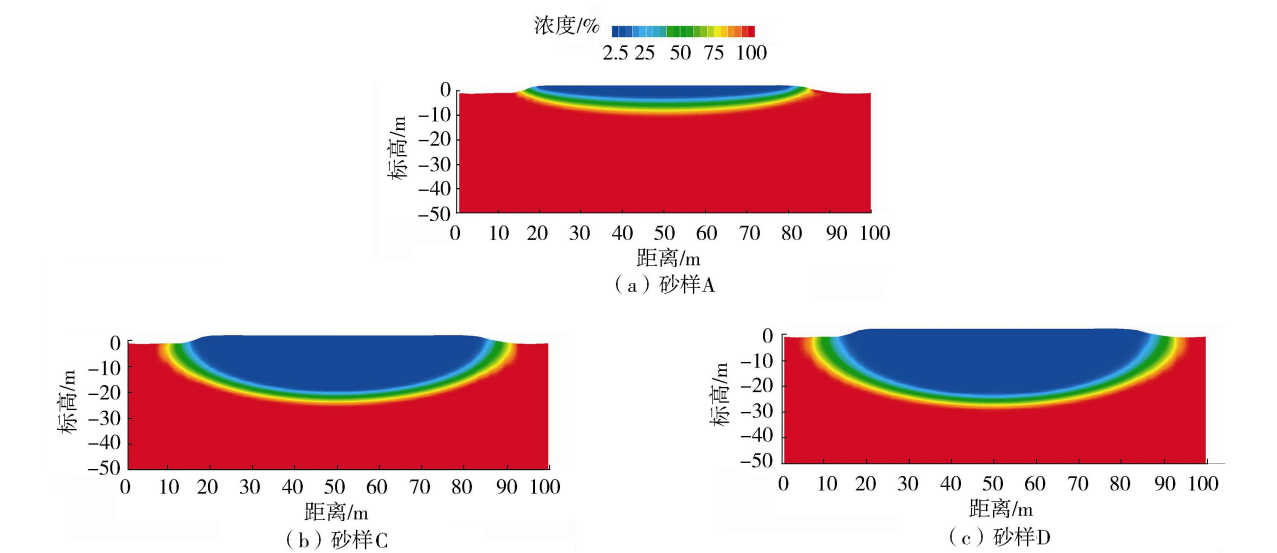


图 6 稳定态时砂样 A、C、D 中淡水透镜体的截面面积特征

Fig. 6 Cross-sectional area characteristics of freshwater lens with calcareous coral sand A, C and D in steady state

2.2.1 淡水透镜体的截面面积特征

可以看出,3 组砂样中所形成的淡水透镜体呈现出明显的差异,其中砂样 A 中所形成的淡水透镜体的厚度最小,最大处厚度仅为 1.75 m,而砂样 C 和砂样 D 中淡水透镜体的最大厚度却分别为 18.83 m 和 21.62 m,说明岛礁淡水透镜体的厚度与珊瑚砂水理参数间存在着密切的联系,一般来说渗透系数越大,咸淡水间的混合作用加强,导致岛礁淡水透镜体的厚度变薄储量减少。Schneider 等^[12]曾指出,当其他条件一定时,岛礁淡水透镜体的厚度依赖于补水率 R 与渗透系数 K 的比值,若 R/K 越大,则岛礁淡水透镜体越厚;而当补水率 R 一定时,淡水透镜体的厚度与渗透系数呈负相关的联系。

2.2.2 淡水透镜体的储量特征

通常淡水透镜体的中间厚、边缘薄,如图 7 所示,但有时较厚的淡水透镜体并不意味着较大的淡水资源储量,根据岛礁淡水透镜体的储量计算公式分别对不同砂样中淡水透镜体的资源储量进行评价^[13],具体计算公式如下:

$$V_s = S_y V_w \tag{1}$$

式中: V_s ——淡水透镜体的储水量; S_y ——钙质珊瑚砂的给水度; V_w ——模型计算出的淡水透镜体的网格体积。

根据图 8 可以看出,随着时间的不断推移,淡水透镜体逐渐生成并最终达到稳定。尽管砂样 D 中所形成的淡水透镜体的网格体积为 5.07 万 m^3 ,但其淡水资源储量却并不是 3 组砂样中最大的,仅为 604.08 m^3 ,相反砂样 C 中的淡水资源储量最大,达到了 779.52 m^3 。根据岛礁淡水透镜体的储量计算公式可以看出,这时钙质珊瑚砂的给水度起了重要的作用,由于砂样 D 的给水度为 0.0119,远小于砂样 A 和 C 的 0.103 和 0.0184,表明了当地下水位下降一定深度时,在重力作用下能够自由排出的水的体积变小,即能被利用的这部分淡水资源相对较少。

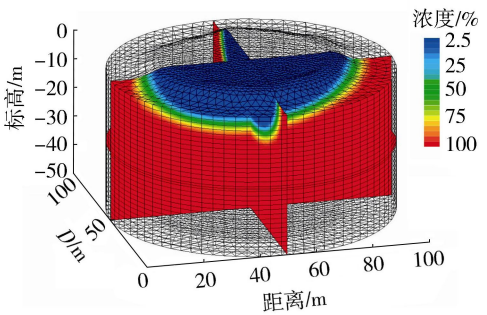


图 7 淡水透镜体的三维形态

Fig. 7 3-D shape of a freshwater lens

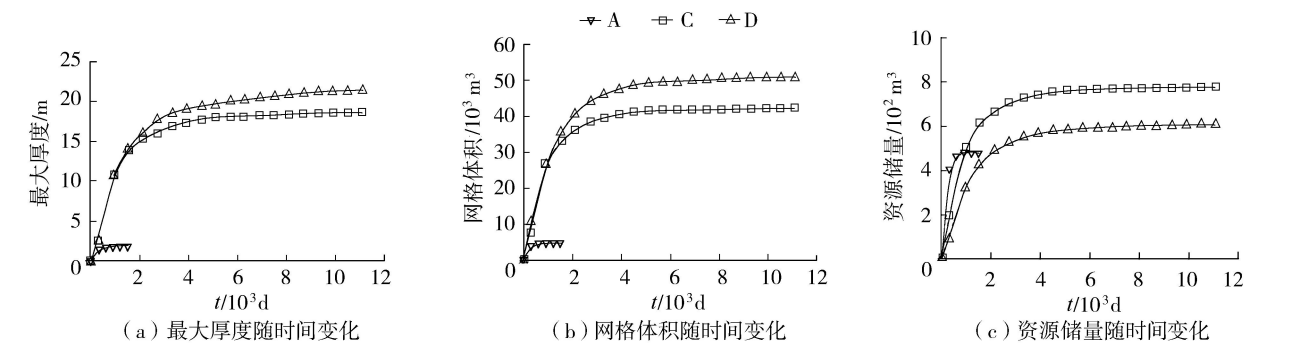


图 8 淡水透镜体的最大厚度、网格体积及资源储量随时间的变化

Fig. 8 Max thickness, mesh volume and resource storage of freshwater lens with time

3 珊瑚砂微观结构镜下分析

西沙群岛也是我国岛礁发育的海域之一,束龙仓等^[14]曾在西沙群岛采集了 29 kg 珊瑚砂样,并采用常规方法测定了砂样的孔隙度、渗透系数、给水度以及弥散系数,其均值都明显高于本文测定钙质珊瑚砂,如渗透系数的平均值在 706.61 m/d 左右,而孔隙度和给水度分别为 0.53 和 0.29。为探明究竟,笔者在镜下观察二者的显微结构,发现两者颗粒形状存在着明显区别:西沙群岛钙质珊瑚砂(图 9(a))的磨圆度相对较好,多呈球形或短棒状,而本文表层钙质珊瑚砂(图 9(b))的颗粒多呈片状。初步分析是因为造礁生物与水动力方面存在差异。本文的取样地点受人工影响较大,表层珊瑚砂掺杂开挖潟湖和航道所取的珊瑚砂,因此水动力条件较强,并且砂体中的珊瑚藻(*coralline algae*)和仙掌藻类(*halimeda cylindracea*)含量较多,使得砂体呈白色或灰白色,易破碎,细粒含量较高。当地下水流经过时,可移动细粒会在渗流过程中挣脱颗粒和孔隙的束缚,随着渗流运移并充填粗颗粒骨架之间的空隙或孔隙,从而降低了颗粒间的孔渗性^[15]。而西沙群岛的钙质珊瑚砂则多是由文石质或方解石质的珊瑚碎屑组成^[16],质地相对较硬,不易破碎,且由于天然形成,长期经受海浪及风暴潮的搬运侵蚀,故磨圆度较好。

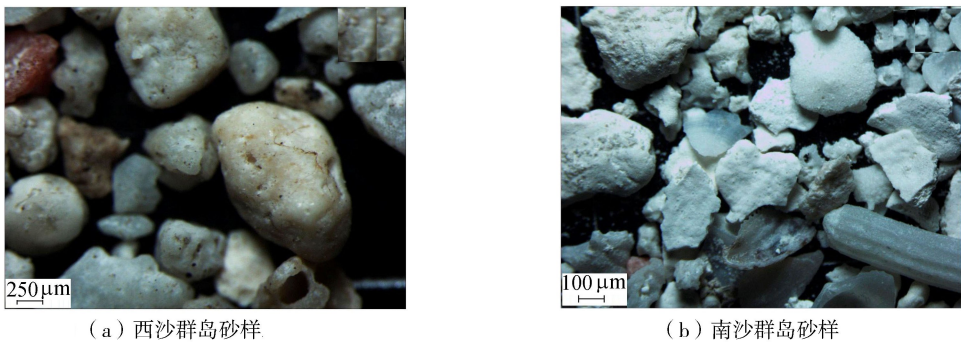


图 9 钙质珊瑚砂的镜下照片

Fig. 9 Microscopic comparison of calcareous coral sand

4 结 论

- a. 试验测得钙质珊瑚砂以中细粒为主,多具有级配不良且不均匀的特征,其孔隙度多在 0.35 ~ 0.51 之间,而渗透系数和给水度区域间差异较大,通常在 0.023 ~ 12.73 m/d 和 0.01 ~ 0.10 之间。
- b. 岛礁地下淡水透镜体厚度与钙质珊瑚砂水力参数间存在着密切的联系,渗透系数越大,咸淡水间的混合作用加强,导致岛礁淡水透镜体的厚度变薄,给水度则主要影响淡水透镜体的资源储量。
- c. 与前人测得西沙群岛的钙质珊瑚砂相比,本文测得珊瑚砂的粒度更细,且渗透系数、给水度和弥散系数相对较小,镜下照片显示钙质珊瑚砂的颗粒多呈片状且磨圆度差,反映了水动力条件差和造礁生物方面的差异。

参考文献:

[1] 朱长岐,陈海洋,孟庆山,等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831-1836. (ZHU Changqi,CHEN Haiyang,MENG Qingshan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7):1831-1836. (in Chinese))

[2] 汪稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究:从事珊瑚礁研究 30 年[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 202-207. (WANG Ren, WU Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs-Engaged in coral reef research for 30 years[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 202-207. (in Chinese))

[3] 束龙仓, 陶月赞. 地下水水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版, 2009.

[4] 南京水利科学研究院. 土工试验规程:SL237—1999[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.

[5] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[6] FETTER C W. Contaminant Hydrogeology[M]. Long Grove: Waveland Press, Inc. , 2008.

[7] 梅一, 吴吉春. FEMWATER 模块下三维有限元网格的构建[J]. 工程勘察, 2008(9): 28-31. (MEI Yi, WU Jichun. Construction of 3D finite element mesh by FEMWATER module [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(9): 28-31. (in Chinese))

[8] 施小清, 姜蓓蕾. FEMWATER 在地下水流数值模拟中运用[J]. 工程勘察, 2008(4): 27-32. (SHI Xiaoqing, JIAN Beilei. Application of FEMWATER in numerical simulation of groundwater flow [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(4): 27-32. (in Chinese))

[9] GELHAR L W, WELTY C, REHFELDT K W. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers[J]. Water Resources Research, 1992, 28(7): 1955-1974.

[10] NEUMAN S P. Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty[J]. Water Resources Research,1973, 9(4):1006-1021.

[11] 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 Yongxing Island[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018,45(6):7-14. (in Chinese))

[12] SCHNEIDER J C, KRUSE S E. A comparison of controls on freshwater lens morphology of small carbonate and siliciclastic islands; examples from barrier islands in Florida[J]. Journal of Hydrology, 2003, 284:253-269.

[13] 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))

[14] 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 Science), 2008, 36(3):330-332. (in Chinese))

[15] 胡明鉴, 崔翔, 王新志, 等. 细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8):1-6. (HU Mingjian, CUI Xiang, WANG Xinzhi, et al. Experimental study on the effect of fine particles on permeability of the calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8):1-6. (in Chinese))

[16] 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. Coral community dynamics and shallow-water carbonate deposition of the reef-flat around Yongxing Island, the Xisha Islands[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(3): 472-487. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-10 编辑:张志琴)