

珊瑚砂剖面结构与水文条件对坡面水文与砂输移的影响

王林华^{1,2}, 俞梦笑^{1,2}, 王森浩^{1,2}, 李志鹏^{1,2}, 李旭^{1,2}, 刘菊秀^{1,2}, 闫俊华^{1,2}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 华南国家植物园, 广州 510650)

摘要: [目的] 与天然形成的热带珊瑚岛相比, 新成珊瑚岛因其建成过程中水力冲填和沉积导致剖面分布有致密层。为探明珊瑚砂剖面结构水力性质和水文条件对坡面水分入渗、壤中径流等水文过程与珊瑚砂颗粒输移的影响。[方法] 以新成珊瑚岛剖面致密层为研究对象, 通过珊瑚岛原位剖面调查和取样, 分析珊瑚砂剖面的质地类型及其水文物理性质。结合室内珊瑚砂模拟降雨试验, 分析均质和致密层分布的坡面在不同水文条件下的水文与珊瑚砂流失过程特征。[结果] 粗质珊瑚砂具有较强导水能力, 而致密层导水能力较差, 饱和导水率仅为其他质地类型珊瑚砂的 8%。均质珊瑚砂坡面降水全部入渗淋溶, 无地表径流。而致密层可延滞水分向深层迁移, 坡面以壤中径流为主, 约占总降水量的 87%, 导致珊瑚砂体内出现颗粒输移流失。同时, 水文条件从自由入渗、水分饱和到渗流的改变可促进壤中径流量和珊瑚砂流失量, 但导水能力低的致密层能削减渗流条件下珊瑚砂流失量。[结论] 致密层可明显改变珊瑚砂淡水水文和砂颗粒流失, 导致局部区域淡水循环浅层化、溶蚀裂隙发育等潜在效应。研究结果对理解珊瑚岛淡水循环过程和建设生态岛均具有重要意义。

关键词: 致密层; 水文条件; 径流过程; 珊瑚砂输移; 珊瑚岛

中图分类号: P334.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0179-09

Effects of Coral Sand Profile Structure and Hydrological Conditions on Slope Hydrology and Sand Transport

WANG Linhua^{1,2}, YU Mengxiao^{1,2}, WANG Senhao^{1,2}, LI Zhipeng^{1,2}, LI Xu^{1,2}, LIU Juxiu^{1,2}, YAN Junhua^{1,2}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. South China National Botanical Garden, Guangzhou 510650, China)

Abstract: [Objective] Compared with naturally formed tropical coral islands, newly formed coral islands develop dense layers within their profiles due to hydraulic filling and sedimentation during the construction process. This study aims to investigate the effects of the hydrological properties and hydrological conditions of coral sand profile structures on hydrological processes such as slope water drainage, subsurface runoff, and coral sand particle transport. [Methods] Taking the dense layers in the profile of a newly formed coral island as the research object, in-situ profile surveys and sampling were conducted to analyze the texture types and hydro-physical properties of the coral sand profile. Combined with laboratory-simulated rainfall experiments, the hydrological process and coral sand loss characteristics on slopes with homogeneous layers and dense layers under different hydrological conditions were analyzed. [Results] Coarse coral sand exhibited strong hydraulic conductivity, while the dense layer had poor hydraulic conductivity, with a saturated hydraulic conductivity only 8% of that of other coral sand texture types. On slopes with homogeneous coral sand, all rainfall infiltrated through leaching, with no surface runoff. In contrast, the dense layer retarded water migration to deeper layers, causing subsurface runoff as the main form, accounting for about 87% of total rainfall and leading to particle transport and loss within the coral

收稿日期: 2025-03-19

修回日期: 2025-04-21

录用日期: 2025-05-16

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-07-07

资助项目: 国家重点研发计划“海洋环境安全保障与岛礁可持续发展”重点专项 (2022-102); 国家自然科学基金项目 (4247012753); 广州市科技项目-基础与应用基础研究项目 (202201010341)

第一作者: 王林华 (1987—), 男, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀机理、流域水土保持效应研究。E-mail: lhwang@scbg.ac.cn

通信作者: 闫俊华 (1973—), 男, 研究员, 主要从事全球变化生态学研究。E-mail: jhyan@scib.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

sand body. At the same time, changes in hydrological conditions, from free drainage to saturation and seepage, could promote subsurface runoff and coral sand loss, but a dense layer with low hydraulic conductivity could reduce coral sand loss under seepage conditions. [Conclusion] Dense layers can significantly alter the freshwater hydrology and sand particle loss of coral sand, potentially leading to effects such as shallower freshwater circulation and the development of dissolution fissures in localized areas. These results are of great significance for understanding the circulation process of coral islands and for the construction of ecological islands.

Keywords: dense layer; hydrological condition; runoff process; coral sand transport; coral island

Received: 2025-03-19

Revised: 2025-04-21

Accepted: 2025-05-16

Online(www.cnki.net): 2025-07-07

作为我国固有蓝色国土,南海及其岛屿是我国海上丝绸之路的重点建设区域,也是维护区域安全的战略要地。近年来,我国创造性地对珊瑚礁砂进行绞吸、耙吸等方式通过管道运输到礁盘,以实现南海现有岛礁扩容,短时间内完成珊瑚岛基础设施建设。同时,通过珊瑚岛稳态工程、植被构建与深度绿化、生态淡水涵养等措施,推进建设生态活岛和宜居岛取得显著成效。这有效地巩固了海防,维护了我国海洋权益,满足建设海上安全通道的基本需求。

作为珊瑚岛淡水重要贮存空间,珊瑚砂中的水分是联系降雨、入渗、蒸散发、补给地下淡水资源等地表和地下介质间水文过程的关键环节,是建设生态岛的制约因子之一。珊瑚岛淡水来源以大气降水为主,降水入渗进入珊瑚砂体后形成稳定的地下淡水体^[1]。珊瑚礁砂作为一种主要成分为碳酸盐的海相砂土类介质,具有多孔隙、易破碎和胶结弱等特性^[2]。珊瑚砂颗粒在填筑过程中受自重和水力作用下发生分选。粗颗粒砂运移距离短,先沉积,而粉粒和黏粒随水流迁移沉积,再经机械振冲作用促进粗细分离、紧实,最后形成黏粒致密层。经过反复填压施工,地层剖面形成了厚度不等、质地差异显著的层状结构。剖面珊瑚砂物理特性,如质地、体积质量、颗粒机械组成和导水率,决定了珊瑚砂水文物理性质,影响着珊瑚砂持水性和导水性,进而改变珊瑚砂剖面中的水分动态、运移速率与方向,增强珊瑚砂水文过程异质性。可见,珊瑚岛地下淡水形成与演化,不仅取决于礁盘地质结构、大气降水和蒸散发等因子,还与珊瑚砂质地、剖面结构及其水力学性质等密切相关。因此,开展珊瑚礁砂剖面水力学性质、水文与砂输移特征的研究,有助于明确珊瑚岛致密层对地下淡水形成与演化等海岛水文过程作用机理。

国内外学者针对土壤剖面夹黏层性质特征及其效应展开系列研究。结果表明土壤在发育演化进程中因受到水文、地质、气象和人类活动等作用,剖面中分布有导水率差异显著的细质与粗质土层。例如,河流冲积平原区域因黏砂沉积差异形成的剖面^[3];农地因长期耕作形成的压实致密层或犁底

层^[4];荒漠绿洲区的夹黏土层^[5]。有关土壤剖面黏土夹层的研究目前多集中在其基本物理性质、水分再分配、水文和盐分运移过程等方面^[6-8]。土壤剖面由于夹黏层孔隙分布变化,一方面明显减弱水分向下入渗,补给深层地下水,但可显著提高夹黏层以上的土壤水分体积分数,供给植被水分生长需求,如在荒漠绿洲区中出现夹黏土层区域的植被覆盖度高于相同水热状况下不含夹黏土层的区域^[9];另一方面,夹黏土层能减少因强烈蒸散发作用引起的地下水位上升作用,如在农田黏土层具有抑制深层水分提升能力,减少表土盐分积聚^[10-11]。可见,土壤剖面中夹黏层对水分、养分和盐分物质运移具有明显的双重影响。相关研究为珊瑚岛剖面致密层生态水文与工程效应研究提供了参考借鉴。

因建成过程特殊性,地下礁砂剖面分布有厚度不等的珊瑚砂致密层,这将使得珊瑚岛淡水循环过程在水平、垂直方向存在异质性,从而影响珊瑚岛礁地下淡水形成、演化速率和淡水储量等过程。目前,关于珊瑚岛的研究主要关注珊瑚砂工程力学特性、理化性质及海岛植被恢复等方面^[12-15],但针对珊瑚岛剖面致密层水力学性质及其水文与珊瑚砂输移过程的研究较为薄弱,仍需进一步开展探究。基于此,本研究以热带珊瑚砂剖面为研究对象,通过原位开挖珊瑚砂剖面调查与采样,测定珊瑚砂剖面粗颗粒层与致密层水文物理性质和水分特征曲线,分析剖面致密层导水和持水能力。同时利用模拟降雨试验,分析不同水文条件下致密层在降雨过程中径流、珊瑚砂输移特征,明确珊瑚砂致密层对坡面水文和输砂作用,探讨致密层对珊瑚岛地表水文过程、地下淡水形成与演化的影响,以期深入了解其淡水循环过程与机理、植被恢复提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南省三沙市南沙群岛中某一由钙质沉积物形成的珊瑚岛,剖面结构分层明显。土壤类型

参照《第三次全国土壤普查暂行土壤分类系统(试行)》^[16]命名为石灰扰动人为新成土,归属于砂质碳酸盐型-石灰扰动人为新成土土属。该地属于典型热带海洋湿润气候,年平均气温为28.4℃,最高月平均气温30.3℃,最低月平均气温27℃。年平均降水量为1 808 mm,降水年内分布不均;最大月降水可达724 mm,最小月降水甚至为0 mm,降水量月际分布不均。岛上主要植被有木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Forst.)、榄仁(*Terminalia catappa* L.)、海滨木巴戟(*Morinda citrifolia* L.)、草海桐(*Scaevola sericea* Vahl)和狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers)等灌木和草本。

1.2 野外取样与室内分析

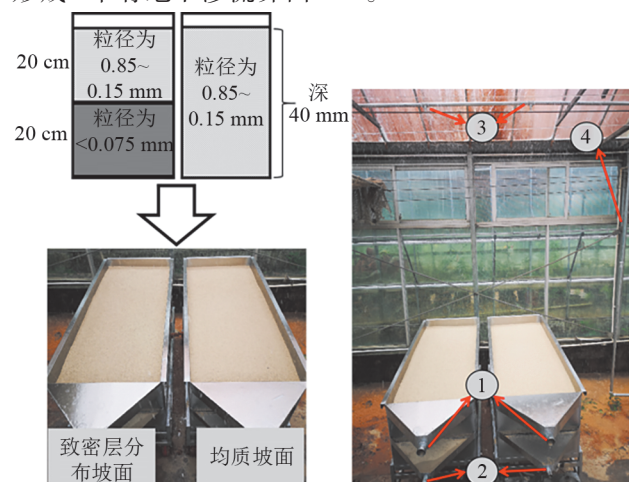
本研究于2023年9月在南沙新成珊瑚岛开展剖面调查。因此,本研究选取有致密层分布的代表性样点进行珊瑚砂剖面开挖,分别在0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm深度处取样。每层取3个环刀(100 cm³)样品,分别用于测定珊瑚砂容重、珊瑚砂饱和导水率、水分特征曲线。同时,在相同深度处收集约50 g珊瑚砂样品,装入塑封袋用于测试珊瑚砂颗粒的机械组成。

珊瑚砂体积质量分数采用烘干称重法^[5]测定;饱和导水率采用定水头法^[17]测定;珊瑚砂颗粒机械组成采用马尔文激光粒度仪测定样品的黏粒、粉粒和砂粒百分比质量分数^[5],按照土壤颗粒分级系统对珊瑚砂进行质地分类。珊瑚砂水分特征曲线采用压力膜仪测定,每个样品测定9个吸力值(10、20、40、50、80、150、300、580、780 kPa)对应的珊瑚砂水分体积分数^[18]。采用van Genuchten模型对吸力值-水分体积分数关系进行特征曲线拟合,获得该模型相关参数^[19]。依照土壤水分特征曲线在33、1 500 kPa吸力值时土壤水分体积分数对应为土壤田间持水量和凋萎系数。根据各珊瑚砂水分特征曲线计算珊瑚砂有效水分体积分数^[17]。

1.3 室内模拟降雨试验

室内模拟降雨于2024年5月9日至6月1日在中国科学院华南植物园科研区(广东省广州市)进行。试验槽采用可调节坡度不锈钢材质,其规格为1.6 m(长)×0.5 m(宽)×0.5 m(深),表层和深20 cm处分别设有地表径流、壤中流收集口,试验钢槽见图1。为确保水分能自由入渗,钢槽底部均匀分布有7排直径为5 mm的排水孔,每排3个排水孔。试验材料所用的珊瑚砂为珊瑚条经粉碎过筛后制成。根据致密层颗粒级配分析和前人^[20]研究结果,珊瑚岛礁致密层颗粒粒径<0.075 mm。同时,根据珊瑚岛剖面实地调查结果显示,剖面中含有多层厚度为10~50 cm粒径<0.075 mm的致密层。本研究为模拟致密层分布的坡面,致密层厚度设置为20 cm。本试验将粉碎珊瑚

砂分别通过0.85、0.15、0.075 mm孔径。待珊瑚砂分筛完成后,先将少于0.075 mm的珊瑚砂装填至底层20 cm,浇水至饱和,让其自然沉降紧实,然后在上层20 cm装填0.85~0.15 mm粗质珊瑚砂。均质坡面则装填40 cm厚0.85~0.15 mm粗质珊瑚砂(图1)。因新成珊瑚岛较平整,本研究试验槽坡度设定为3°。同时,考虑到热带珊瑚岛在枯水期水分能完全下渗;丰水期连续降雨导致下层珊瑚砂水分饱和及海水涨潮涌至珊瑚砂体形成壤中流等不同水文条件。因此,本试验对应设置3种不同水文条件,分别为自由入渗(free drainage)、饱和(saturation)和渗流(seepage)条件。珊瑚砂坡面饱和条件采用马氏瓶控制,马氏瓶进水管跟试验槽底部导水管连通,让试验槽20~40 cm间珊瑚砂充分饱和,在降雨过程中始终保持连通,直至降雨结束。渗流条件则是试验槽底部导水管连接1个自由水面高于20 cm的导水管,降雨试验进行时导水管连通水泵进行持续供水,试验槽深20 cm处形成1个有地下渗流界面^[21-22]。



注:1为地表径流收集口;2为壤中径流收集口;3为降雨喷头;4为进水管。

图1 试验槽尺寸、珊瑚砂装填示意及模拟降雨试验

Fig.1 Diagrams of experimental trough size and coral sand filling and experimental setup for simulated rainfall experiments

试验模拟降雨装置为下喷式降雨机,喷头为Fulljet GW型号,喷头高度为3.0 m,有效降雨面积为3.0 m×3.0 m(图2)。降雨均匀度为80%,降雨强度为60~140 mm/h。暴雨和大暴雨事件是影响珊瑚砂体水分与输移的重要因素之一,根据珊瑚岛气象站监测数据显示,最大日降雨量可达116 mm^[23]。因此,本试验设计降雨强度为120 mm/h,降雨历时为1 h,场降水总量为120 mm,每个处理重复1场降水。

降雨试验开始后,当收集口有连续径流时,记录起始时间及接取径流样。径流-珊瑚砂流失过程用1.0 L的塑料瓶收集,取样周期为3 min。当降雨结束后,进

行样品称量、静置 24 h,倒掉上清液后将珊瑚砂冲洗到铝盒中,放入 105 ℃烘箱,待烘干后称重。由此可计算场降水引起的径流总量、珊瑚砂输移总量等特征^[24-25]。

1.4 统计分析

本研究采用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行单因素方差分析和珊瑚砂水分特征曲线 Van Genuchten 模型拟合,采用 SigmaPlot 14.0 软件制图。

表 1 珊瑚岛不同深度珊瑚砂剖面体积质量、饱和导水率、粒径组成及其质地类型

Table 1 Volume masses, saturated hydraulic conductivities, particle size compositions, and texture types of coral sand profiles at different depths in coral islands

剖面编号	土层深度/cm	体积质量/(g·cm ⁻³)	饱和导水率/(cm·min ⁻¹)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	质地类型
1#	0~10	1.27	1.21	10.2	41.7	48.2	壤土
	10~20	1.17	0.54	5.4	13.5	81.1	砂壤土
	20~40	1.20	0.23	2.0	36.2	61.8	壤土
	40~60	1.67	0.04	75.6	18.4	6.0	重黏土
	60~80	1.01	0.19	13.2	47.2	39.5	粉壤土
2#	0~10	1.25	0.40	1.9	19.6	78.5	砂壤土
	10~20	1.55	0.16	2.7	49.8	47.6	粉壤土
	20~40	1.68	0.06	73.4	15.9	10.7	重黏土
	40~60	1.11	0.45	3.7	79.0	17.3	粉壤土
3#	0~10	1.18	1.12	8.9	51.5	39.6	粉壤土
	10~20	1.12	1.43	6.9	48.2	45.0	粉壤土
	20~40	1.10	0.64	1.6	58.8	39.6	粉壤土
	40~60	1.05	0.69	3.8	77.6	18.6	粉壤土

剖面其他珊瑚砂层以粉粒和砂粒为主,其平均质量分数分别为 47.5% 和 47.0%,黏粒仅占 5.5%,质地类型为壤土、粉壤土和砂壤土(表 1)。此类珊瑚砂层体积质量为 1.01~1.55 g/cm³,平均体积质量为 1.18 g/cm³;而致密层体积质量约为 1.68 g/cm³,显著高于其他质地类型珊瑚砂层。

珊瑚砂质地和体积质量等性质差异必然影响其导水和持水性能。珊瑚砂饱和导水率为 0.23~1.43 cm/min,平均值为 0.69 cm/min;而珊瑚砂致密层饱和导水率为 0.04~0.06 cm/min,仅为其他质地珊瑚砂饱和导水率的 8%(表 1)。粉质或壤质珊瑚砂由于粉粒或砂粒质量分数大,颗粒间孔隙度大,水分吸力作用弱,其水分体积分数在低水吸力阶段随水吸力增加而陡降,尤其是砂质类型珊瑚砂表现最明显(图 2)。随着水吸力持续增加,珊瑚砂水分体积分数会缓慢降低,直至相对稳定。致密层黏粒质量分数高,具较大比表面积,毛管孔隙作用强,在低水吸力阶段水分体积分数减少相对缓慢,而在高水吸力阶段水分体积分数持续降低后趋于平缓。

因此,在珊瑚岛剖面的致密层含砂量少,颗粒细腻,体积质量大,导水能力弱,保水性能好;而其他质

2 结果与分析

2.1 珊瑚砂剖面质地与水文物理性质差异

与自然形成的热带珊瑚岛相比,珊瑚岛剖面因构筑材料特殊性、成岛时间短,其剖面结构分布有间断沉积的黏粒层(图 1)。该黏粒致密层厚度约 10~50 cm,黏粒质量分数约 74.0%,粉粒和砂粒质量分数分别为 17.2% 和 8.8%,质地类型为重黏土(表 1)。

地类型珊瑚砂以粗颗粒为主,呈较弱持水和较强导水能力。

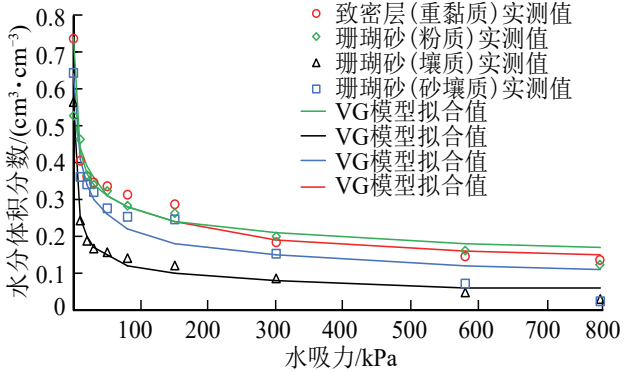


图 2 4 种典型质地珊瑚砂的水分特征曲线
Fig.2 Moisture characteristic curves of four typical coral sand textures

2.2 珊瑚砂坡面产流过程对剖面结构与水文条件的响应

均质与有致密层分布的 2 类剖面特征的坡面在模拟降雨条件下径流-珊瑚砂输移过程见图 3。结果表明,均质珊瑚砂(粒径为 0.85~0.15 mm)与深层有致密层(粒径<0.075 mm)分布的珊瑚砂坡面对降雨产流响应过程差异明显。

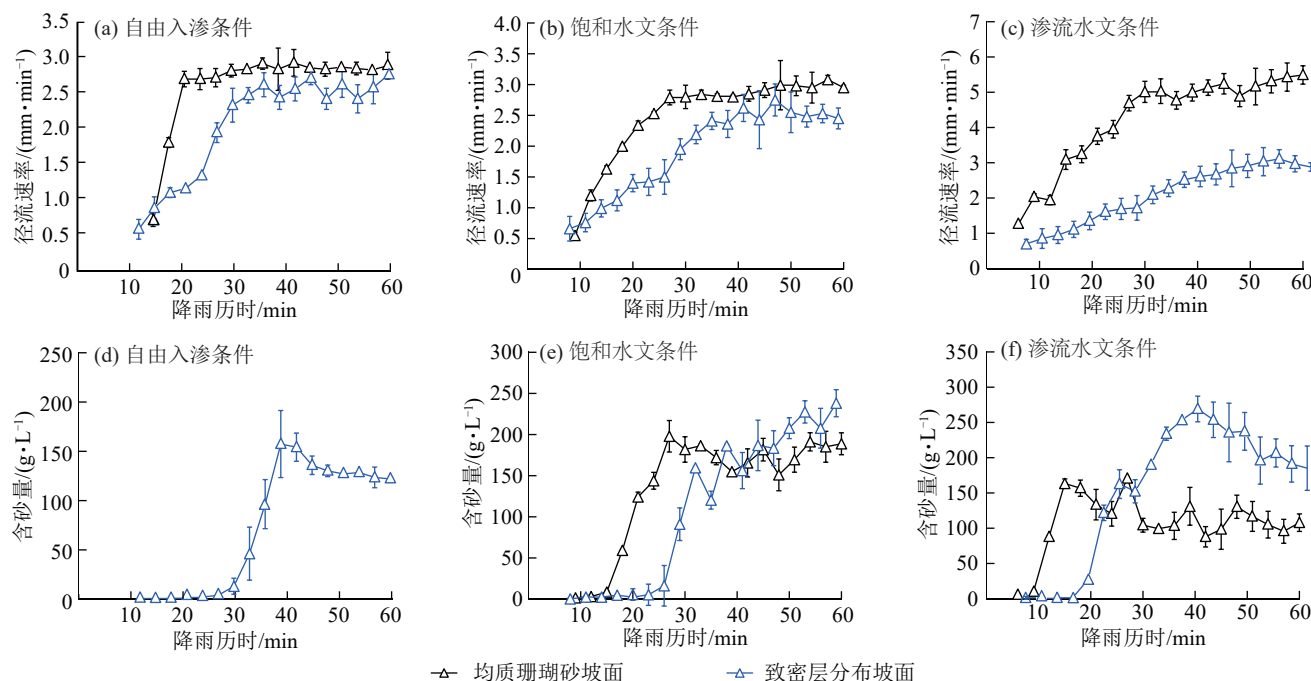


图3 均质和有致密层分布的珊瑚砂剖面在不同水文条件下降雨过程径流率和含沙量变化过程

Fig.3 Runoff rate and sediment concentration changes during rainfall on homogeneous coral sand profiles and profiles with dense layers under different hydrological conditions

由于珊瑚砂颗粒较大,全部入渗转化为珊瑚砂水分体积分数和向深层淋溶,2个坡面均无地表径流产生。在均质坡面,降水均向深层入渗,其淋溶速率总体呈现为快速增长至稳定产流(2.91~3.10 mm/min)变化特征。而在致密层分布的珊瑚砂坡面,降水在向深层运动过程中因致密层导水能力锐减引起水分滞留,导致密层界面形成横向径流与珊瑚砂流失。随降雨持续进行,珊瑚砂水分体积分数逐渐达到饱和,初始壤中径流速率由0.55~0.92 mm/min逐渐增大至稳定阶段(3.10~3.13 mm/min),其壤中径流速率与均质珊瑚砂坡面淋溶速率相近。整体上珊瑚砂坡面的降水分配主要转为壤中径流,平均占降雨总量的87.2%,而淋溶至深层的水量仅占12.8%。

近地表水文条件是影响珊瑚砂体水文过程的重要因子之一。由图3可知,均质和有致密层分布的珊瑚砂坡面在自由入渗、饱和与渗流等3种水文条件下壤中流过程、径流总量发生明显分异。结果表明,均质坡面在自由入渗条件下入渗径流总量(131.88 mm)与饱和水文条件下壤中径流总量(135.07 mm)相近。均质坡面在饱和条件下其实质形成1个滞水界面,但入渗水流运动由垂直方向转变为横向壤中径流。

均质坡面在渗流条件下(速率为0.9 mm/min),壤中径流平均速率和总量显著增加,分别为饱和水文条件下的1.7、2.0倍(图54)。因致密层珊瑚砂具有较低导水能力,一方面可减少水分向下淋溶漏失,促进形成横向壤中径流;另一方面,也可降低由深层至浅层的渗流补水。

致密层分布的坡面在自由入渗、饱和和渗流水文条件下,其壤中径流量分别为116.99、132.73、143.31 mm。在饱和水文条件下,2类坡面壤中径流总量相近。而在自由入渗条件下,致密层降低约87%淋溶径流量;在渗流水文条件下,致密层降低约92%壤中径流量。因此,珊瑚砂剖面中致密层对坡面降水再分配具有调控作用,在垂直方向上降低降水向深层淋溶,削减渗流作用。

2.3 珊瑚砂流失过程对剖面结构与水文条件的响应

由图3和图4可知,坡面结构与近地表水文条件对珊瑚砂颗粒输移流失过程和总量均具有重要影响。在均质坡面,因全部降水向深层入渗而未监测到珊瑚砂颗粒随入渗水流在垂直方向上的迁移流失。由于在本试验钢槽底部淋溶液出口处垫有细孔塑料膜,阻滞细颗粒珊瑚砂垂向流失。对于有致密层分布的坡面,全部降水通过高入渗能力的粗颗粒珊瑚砂层并渗流至致密层,雨水沿松散层与致密层界面向下坡汇集形成壤中径流,引起珊瑚砂颗粒流失。由图4可知,在初始阶段,壤中径流含沙量为0.66~5.76 g/L,均处于较低水平。随着降雨进行,珊瑚砂逐渐达到饱和,水分体积分数和壤中径流连通性增强,壤中径流速率迅速增加,其携带的珊瑚砂能力增强,含砂量增至168.53~191.41 g/L,造成珊瑚砂体内颗粒位移与流失。自由入渗、饱和和渗流3种水文条件对均质和有致密层分布的坡面壤中径流含砂率变化过程与输移总量影响见图3和图4。

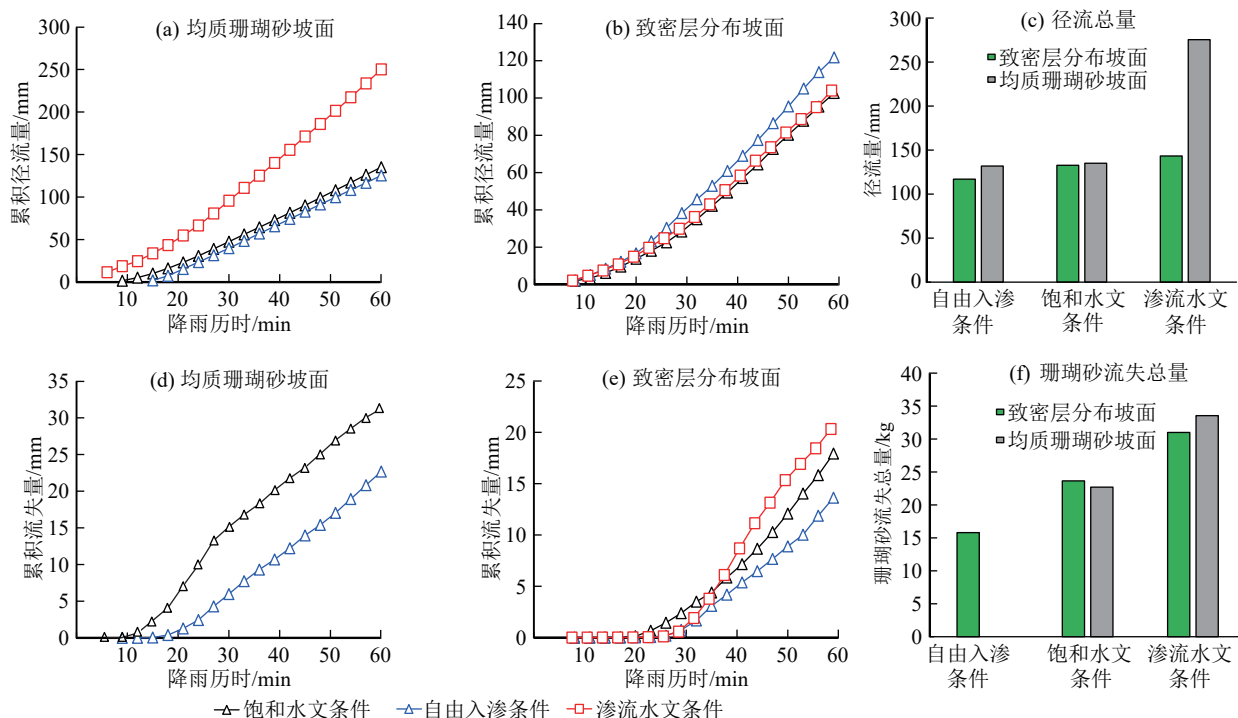


图4 均质和有致密层分布珊瑚砂剖面在不同水文条件下降雨过程中径流量、珊瑚砂流失量的累积过程与总量特征

Fig.4 Cumulative processes and total amount characteristics of runoff and coral sand loss during rainfall on homogeneous coral sand profiles and profiles with dense layers under different hydrological conditions

相比于自由入渗条件,2类坡面在饱和与渗流水文条件下,降雨过程中含砂率波动变化更加剧烈。含砂率峰值均出现在降雨后期,同时出现多次峰值。一方面由于珊瑚砂体积含水量持续增加和水文连通性提升,横向壤中径流速率增强使侵蚀搬运能力增加;另一方面,由于珊瑚砂从剖面内部不断流失,造成砂体失稳崩塌,增加可搬运的砂体来源。整体上,2类坡面在饱和条件下珊瑚砂流失量相近,但在渗流条件下,均质坡面珊瑚砂流失量高于致密层坡面珊瑚砂流失量的8.2%。均质珊瑚砂坡面从自由入渗转换至饱和条件,导致形成壤中径流与珊瑚砂流失。当由饱和条件转换为渗流条件时,珊瑚砂流失量增幅为47.5%。致密层分布坡面在饱和条件时,珊瑚砂流失量为自由入渗条件下的1.5倍;由水分饱和条件演变为渗流条件时,珊瑚砂流失量增加约31.1%。

3 讨论

3.1 剖面致密层与水文条件对珊瑚砂体水文-砂输移作用

珊瑚岛剖面致密层的形成,导致体积质量、导水率等水文物理性质差异显著,与土壤剖面中夹黏层的持水特性相一致^[5]。因此,珊瑚砂致密层显著改变剖面水力结构,质地极细的珊瑚砂颗粒形成的滞水层,为侧向壤中径流形成提供一个界面,导致截然不同的壤中径流和珊瑚砂输移过程。显著的坡面水文响应表现在降水入渗的横向和垂直再分配特征,珊瑚砂体内出现壤中径流。鞠远江等^[26]对不同级配珊瑚

砂在水力梯度条件下渗流过程及其颗粒分析结果显示,珊瑚砂因胶结弱、结构松散,导致细颗粒易随渗流迁移分布,可改变剖面渗透特性;且随渗流强度、珊瑚砂体级配及其紧实程度相关。本研究结果表明短时间堆积且固结作用弱的珊瑚砂颗粒因横向壤中径流作用发生迁移,进而引起珊瑚砂体孔隙形成,增强珊瑚砂输移风险,与方乾等^[27]、李焱秋等^[28]在喀斯特地区水土流失过程相似。由于喀斯特地区土壤层厚度较薄,降水一部分能入渗到岩土界面或基岩裂缝引起土壤侵蚀;另一部分形成坡面地表径流和侵蚀,即喀斯特地区同时存在地表与地下水土流失。不同的是,本研究中坡面表层20 cm珊瑚砂颗粒较粗,入渗能力高于试验降雨强度;同时导水能力较弱的致密层起到类似喀斯特区基岩的作用,导致降水易形成壤中径流,出现地下珊瑚砂颗粒流失现象。因此,地层剖面中质地细腻且导水性弱的致密层,作为滞水层有助于促进横向壤中径流形成,进而影响珊瑚岛砂体水分横向、垂向再分配等淡水水文过程^[29-30]。

总之,由于近地表水文条件变化,不仅改变均质珊瑚砂体内渗流方向,增加横向水分再分配,而且显著加剧珊瑚砂流失总量。致密层分布的坡面在自由入渗、饱和水文情形下加剧珊瑚砂流失,但珊瑚砂致密层能削减渗流条件下砂体流失量。因此,致密层剖面横向壤中径流可引起珊瑚砂颗粒迁移,同时地下水文条件可加剧珊瑚砂输移强度。此特殊地表与地下双重水文过程与珊瑚砂流失输移机制增加了珊

瑚岛结构生态效应的复杂性。基于野外海岛调查和模拟试验结果,本研究提出了海岛珊瑚砂颗粒流失与迁移模式。珊瑚砂体内水文-砂颗粒流失速率主要受珊瑚砂粒径、剖面结构、包气带水文条件、地下水位和降雨量等因子影响;而珊瑚砂颗粒流失总量则主要受珊瑚砂粒径、珊瑚砂体紧实固结程度、工程措施和植物措施等因子影响。然而,珊瑚砂体壤中径流及其引起的珊瑚砂颗粒输移如何影响海岛地下淡水水文过程、裂缝发育演变等方面仍是不清楚。同时,本研究仅考虑了一种级配组成的珊瑚砂与剖面致密层在强降雨强度下水文过程和珊瑚砂流失,仍有复杂的珊瑚砂剖面结构及其在多个影响因子驱动下珊瑚砂流失特征未被研究。因此,需要进一步开展试验与监测珊瑚岛剖面结构对珊瑚岛水文过程、地下淡水形成与蓄积等生态效应的影响,以便更好地明确珊瑚岛淡水循环过程机理。

3.2 剖面结构异质性的水文-珊瑚砂输移效应展望

珊瑚岛地下淡水透镜体的形成是解决淡水资源短缺、维持生态系统平衡、支撑人与自然生态系统的关键生源要素之一。天然形成的热带珊瑚岛,地层结构和地表生态系统相对稳定,形成稳定的地下淡水透镜体,其形成演变过程主要受降水、土壤结构、地形、水文地质和植被等多要素、多过程耦合作用^[31-33]。而新成珊瑚岛地层剖面结构与天然珊瑚岛存在显著差异,天然珊瑚岛的地下淡水透镜体形成和演变理论、模型难以解析新成珊瑚岛地下淡水循环机理。因此,天然降水能否形成有效、稳定的地下淡水资源是构建绿色、宜居和生态岛的根本保障。面对海岛淡水形成与演化机理以及生产、生活和生态需水等难题,需要在3个方面开展深入研究。

1)珊瑚砂颗粒间孔隙大,致密层分布导致珊瑚砂剖面结构空间异质性强。珊瑚砂体内水分运动可致颗粒流失、再沉积等物理搬运侵蚀和岩溶化学侵蚀^[34-36]。致密层能阻滞水分下渗、延长水分与珊瑚砂溶蚀作用;层间横向流促进珊瑚砂迁移流失,导致形成大孔隙^[20]。在长期岩溶作用下可能形成孔隙溶洞^[37]。因此,面对珊瑚岛降雨量大、气温高、良好的水热条件,需明确珊瑚岛地层结构对补给地下淡水和供给植被生长能力的影响,进一步开展有关热带珊瑚岛地下淡水水文过程及其溶蚀作用强度等研究。

2)珊瑚岛粗质颗粒砂持水能力有限,致密层会造成局部区域地下淡水补给减少,可提高其剖面上层珊瑚砂的水分,引起水文过程浅层化。而植被为适应珊瑚砂水分分布状况,其所需水分大多来源于表层,导致植被根系分布在近地表层,将不利于抗阻

海上台风。因此,面对热带珊瑚岛淡水资源缺乏、土壤贫瘠,且高温、高风速和高盐雾等自然条件,需进一步筛选具有较强适应性和生态功能的植被种类,如深根系和主根发达、茎干粗壮、抗风能力强、耐盐雾等生理生态特征;同时,研发改良珊瑚砂性质的技术,优化植被恢复措施,从而促进热带珊瑚岛植被恢复。

3)植被恢复和生态重建是生态岛礁建设的核心内容之一,而地下淡水资源的形成和稳定是实现生态岛礁建设的基本前提。因此,面对珊瑚岛生产、生活用水、生态需水等多重压力,需进一步关注岛礁植被生长动态和植被水分利用特征,制定合理的植被恢复措施;亟待开展海岛地下淡水蓄积过程与机理研究,系统评估和预测海岛淡水资源生态承载力演变,研发促进地下淡水透镜体形成的技术方法和更高效、环保的节水措施,为海岛淡水资源利用与管理提供参考。

4 结论

1)以黏粒为主要颗粒组成的致密层体积质量高,具有较低导水能力,可阻滞水分向深处入渗,促进珊瑚砂体内形成横向壤中径流。

2)因珊瑚岛剖面结构分异明显,形成时间短,胶结性弱,细颗粒珊瑚砂极易在径流作用下发生横向位移与流失。

3)珊瑚砂近地表的水文条件,如饱和或渗流条件,可加剧珊瑚砂迁移流失。珊瑚砂颗粒迁移将进一步重塑剖面珊瑚砂的孔隙度和导水率等水力性质。

参考文献:

- [1] 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 D M, CAO G L, SONG X F. 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.
- [2] 纪文栋,张宇亭,裴文斌,等.加载方式和应力水平对珊瑚砂颗粒破碎影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1953-1961.
JI W D, ZHANG Y T, PEI W B, et al. Influence of loading method and stress level on the particle crushing of coral calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(8):1953-1961.
- [3] 李旭红,马志正,董艳,等.黄土中土壤层形成对河流水位、环境变化的响应[J].山西师范大学学报(自然科学版),2000,14(2):63-66.
LI X H, MA Z Z, DONG Y, et al. The response of the formation of soil layers in yellow ocher to the changes of environment and river's level[J].The Journal of Shanxi Teachers University (Natural Science Edition),2000,

- 14(2):63-66.
- [4] 翟振,李玉义,逢焕成,等.黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J].中国农业科学,2016,49(12):2322-2332.
ZHAI Z, LI Y Y, PANG H C, et al. Study on present situation and characteristics of plow pan in the northern region of Huang Huai Hai Plain[J].Scientia Agricultura Sinica,2016,49(12):2322-2332.
- [5] 孙程鹏,赵文智,杨淇越.绿洲边缘夹粘沙丘持水特性[J].生态学报,2018,38(11):3879-3888.
SUN C P, ZHAO W Z, YANG Q Y. Water retention of the clay interlayer of dunes at the edge of an oasis[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3879-3888.
- [6] 柴程武,徐先英,王方琳,等.石羊河尾间黏土质夹层结构土壤对降雨入渗的响应[J].水土保持研究,2021,28(2):163-167.
CHAI C W, XU X Y, WANG F L, et al. Response of clay interlayer structure soil to rainfall infiltration in the lower reaches of Shiyang River[J].Research of Soil and Water Conservation,2021,28(2):163-167.
- [7] 卢修元,魏新平,邱王月,等.粉粘土夹层对砂的减渗规律试验分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(2):22-25.
LU X Y, WEI X P, QIU W Y, et al. Experimental analysis on the infiltration reduction rule by clay interlayer in sand[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2009,20(2):22-25.
- [8] 史文娟,汪志荣,沈冰,等.夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J].水土保持学报,2004,18(6):167-170.
SHI W J, WANG Z R, SHEN B, et al. Soil capillary water upward movement from sand layered soil column[J].Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(6):167-170.
- [9] ZHOU H, ZHAO W Z, ZHANG G F. Varying water utilization of *Haloxylon ammodendron* plantations in a desert-oasis ecotone [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(4):825-835.
- [10] 魏建涛,张建新,范文波,等.犁底层深度对膜下滴灌土壤水盐运移影响的模拟研究[J].土壤通报,2021,52(4):845-853.
WEI J T, ZHANG J X, FAN W B, et al. Effect of the plough bottom depth on the soil water and salt transport under mulched drip irrigation[J].Chinese Journal of Soil Science,2021,52(4):845-853.
- [11] 刘思义,魏由庆,梁国庆,等.粘土夹层土体构型水盐运动的实验研究[J].土壤学报,1992,29(1):109-112.
LIU S Y, WEI Y Q, LIANG G Q, et al. Study on water salt movement in soil body with intercalated clay layer[J].Acta Pedologica Sinica,1992,29(1):109-112.
- [12] 崔翔,朱长歧,胡明鉴,等.珊瑚砂渗透性的微观机理研究[J].岩土工程学报,2020,42(12):2336-2341.
CUI X, ZHU C Q, HU M J, et al. Microscopic mechanism of permeability of coral sand[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(12):2336-2341.
- [13] 钱琨,王新志,陈剑文,等.南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J].岩土力学,2017,38(6):1557-1564.
QIAN K, WANG X Z, CHEN J W, et al. Experimental study on permeability of calcareous sand for islands in the south China Sea [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6):1557-1564.
- [14] 唐健健,胡明鉴,汪稔.珊瑚岛礁地下水水化学特征及其形成机制[J].水文,2020,40(5):85-90.
TANG J J, HU M J, WANG R. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in coral islands[J].Journal of China Hydrology,2020,40(5):85-90.
- [15] 郑坤,孟庆山,汪稔,等.珊瑚礁灰岩工程地质特性研究新进展[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(1):42-49.
ZHENG K, MENG Q S, WANG R, et al. Advances in study of engineering geological characteristics of coral reef limestone[J].Marine Geology and Quaternary Geology,2020,40(1):42-49.
- [16] 国务院第三次全国土壤普查领导小组办公室.关于印发《第三次全国土壤普查暂行土壤分类系统(试行)》的通知[EB/OL].(2023-01-13). https://www.moa.gov.cn/ztzl/dscqgtrpc/gzbs_29134/202505/t20250514_6473945.htm.
Office of the Leading Group for the Third National Soil Census of the State Council. Notice on Issuing the Provisional Soil Classification System for the Third National Soil Census (Trial) [EB/OL]. (2023-01-13). https://www.moa.gov.cn/ztzl/dscqgtrpc/gzbs_29134/202505/t20250514_6473945.htm.
- [17] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. Soil physics [M].Beijing: Higher Education Press,2006.
- [18] 林晓燕,王晶晶,吴炳孙,等.施肥对热带砖红壤胶林土壤水分特征曲线的影响及模型优选[J].水土保持研究,2024,31(1):105-116.
LIN X Y, WANG J J, WU B S, et al. Soil water characteristics curves and model optimization of tropical latosol rubber planting area under different fertilization[J].Research of Soil and Water Conservation,2024,31(1):105-116.
- [19] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [20] 王新志,王星,胡明鉴,等.吹填人工岛地基钙质粉土夹层的渗透特性研究[J].岩土力学,2017,38(11):3127-3135.
WANG X Z, WANG X, HU M J, et al. Study of permeability of calcareous silty layer of foundation at an artificial reclamation island [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(11):3127-3135.
- [21] 王志刚,郑粉莉,李靖.不同近地表水文条件下紫色土坡面

- 土壤侵蚀过程研究[J].水土保持通报,2007,27(6):9-11.
- WANG Z G, ZHENG F L, LI J. Soil erosion process on hillslopes of purple soil under different near-surface hydrological conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(6):9-11.
- [22] 安娟,郑粉莉,李桂芳,等.不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响[J].生态学报,2011,31(24):7579-7590.
- AN J, ZHENG F L, LI G F, et al. Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near-surface soil hydraulic conditions on black soil slope [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24):7579-7590.
- [23] 朱旭.某人工珊瑚礁岛淡水潜水面形成过程研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2019.
- ZHU X. Research on the formation of phreatic surface in an artificial coral reef island [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2019.
- [24] 王林华,马波,吴发启.黄土区不同生长期大豆坡耕地的入渗特征[J].中国水土保持科学,2015,13(4):15-24.
- WANG L H, MA B, WU F Q. Infiltration characteristics in sloping farmland at different growth stages of soybean (*Glycine max* L.) in loess area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(4):15-24.
- [25] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.
- WANG L H, WANG Y F, WANG J, et al. Effects of soil surface roughness on runoff generation mechanism on loess slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5):120-128.
- [26] 鞠远江,胡明鉴,秦坤坤,等.珊瑚礁岛钙质砂细颗粒渗透运移规律研究[J].岩土力学,2021,42(5):1245-1252.
- JU Y J, HU M J, QIN K K, et al. Experimental study of filtration and fine particles migration of calcareous sand in coral reef island [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5):1245-1252.
- [27] 方乾,赵龙山,樊春华,等.石漠化区薄土层坡地雨水转化及土壤侵蚀影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(8):88-97.
- FANG Q, ZHAO L S, FAN C H, et al. Influencing factors of rainwater transformation and soil erosion in thin soil hillslope of rock desertification regions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(8):88-97.
- [28] 李焱秋,戴全厚,甘艺贤,等.喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应[J].水土保持学报,2019,33(5):28-33.
- LI Y Q, DAI Q H, GAN Y X, et al. Response of runoff to rainfall intensity and slope on bare slope land in karst [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5):28-33.
- [29] 王浩,许少鸿,陈叶健,等.闽粤地区花岗岩风化土体粘粒迁移过程的土柱渗流试验[J].山地学报,2024,42(1):132-142.
- WANG H, XU S H, CHEN Y J, et al. Soil solumn seepage test on clay particles migration process of granite weathered soil in Fujian and Guangdong areas, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(1):132-142.
- [30] 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):2925-2930.
- HU M J, CUI X, WANG X Z, et al. Experimental study of the effect of fine particles on permeability of the calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8):2925-2930.
- [31] 盛冲,许鹤华,张云帆,等.钙质砂水理性质及对岛礁淡水透镜体形成的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(4):1127-1138.
- SHENG C, XU H H, ZHANG Y F, et al. Hydrological properties of calcareous sands and its influence on formation of underground freshwater lenson islands [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(4):1127-1138.
- [32] SHENG C, HAN D M, XU H H, et al. Evaluating dynamic mechanisms and formation process of freshwater lenses on reclaimed atoll islands in the South China Sea [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: e124641.
- [33] 樊龙凤,李海英,叶许春.海岛淡水透镜体研究进展及可持续发展展望[J].水资源研究,2019(2):199-208.
- FAN L F, LI H Y, YE X C. Review and prospect of sustainable development of island freshwater lens [J]. Journal of Water Resources Research, 2019(2):199-208.
- [34] 苏悦.桂林市毛村流域碳酸盐岩溶蚀实验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
- SU Y. Experimental research on carbonate rock erosion by the Maocun in Guilin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [35] 袁道先,刘再华.碳循环与岩溶地质环境[M].北京:科学出版社,2003.
- YUAN D X, LIU Z H. Carbon cycle and karst geological environment [M]. Beijing: China Science Press, 2023.
- [36] 杨治国,陈清敏,成星,等.南北地理分界线:秦巴山区碳酸盐岩溶蚀速率研究[J].中国岩溶,2023,42(4):819-833.
- YANG Z G, CHEN Q M, CHENG X, et al. Karst dissolution rates of carbonate rocks in north-south geographical boundary of China: The Qinba Mountain Area [J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(4):819-833.
- [37] 毛世榕,管振德,阎春恒.基于小波包分形和神经网络的地震与岩溶塌陷识别[J].地震学报,2018,40(2):195-204.
- MAO S R, GUAN Z D, YAN C H. A technique for earthquake and karst collapse recognition based on wavelet packet fractal and neural network [J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(2):195-204.