

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.027

樊龙凤, 李海英, 黄真理, 等. 基于人工降水入渗的热带海岛表面砂土层水质变化特征. 土壤, 2021, 53(1): 197–208.

基于人工降水入渗的热带海岛表面砂土层水质变化特征^①

樊龙凤^{1,2,3}, 李海英^{1*}, 黄真理¹, 叶许春⁴, 徐力刚^{2,3}

(1 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008;

3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 珊瑚砂是热带海岛表层土的重要物质组成, 开展大气降水入渗通过表面砂土层的水化学研究是正确认识和评估海岛地下水质的前提。本研究于 2017 年 8 月采集了我国热带海岛 3 种不同样地的典型表层砂土(编号 D1、D2 和 D3), 基于人工降雨模拟试验, 分析了其基本理化参数变化特征。在此基础上, 综合水化学相图、Visual MINTEQ 水文地球化学模拟、碱基交换指数(IBE)计算和 Gibbs 图解等方法, 揭示了渗流通过不同砂土层的水样化学变化特征及主要控制过程。结果表明: ①表面砂土盐碱化程度高, 入渗通过 D1、D2 和 D3 的水样 pH 范围分别为 7.92~8.81、7.86~9.30 和 7.82~9.35, 明显高于大气降水的均值 6.0, 其电导率分别从 48.50、89.90、77.60 mS/cm 降到了 131.4、111.6、98.4 μ S/cm; ②入渗通过 D1、D2 和 D3 的水样中许多微量元素浓度值随降雨淋洗会逐渐减小, 其中 Al、As、B(D1 和 D2)、Cr、Fe、Pb 较难溶于水, 应该引起重视; ③D1、D2 和 D3 储存的水中主要离子浓度大小为: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{Br}^- > \text{F}^-$, 其水化学类型随降雨淋洗均由 Cl-Na 水变为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水; ④控制通过砂土层水样水质的水化学机制包括: 碳酸盐、氯化物和硫酸盐矿物的溶解和沉淀, 以及降水入渗过程中 Na^+ 与 K^+ 、 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 之间的交换作用。该研究对于指导热带海岛地下水资源的合理开发与利用, 保障海岛居民用水安全及生态系统维护具有重要的科学意义。

关键词: 人工降水模拟; 热带海岛; 珊瑚砂土层; 水质变化; Visual MINTEQ

中图分类号: P594; X824 **文献标志码:** A

Water Quality Variation Characteristics of Sandy Layer on Surface of Tropical Islands Based on Simulated Precipitation Infiltration

FAN Longfeng^{1,2,3}, LI Haiying^{1*}, HUANG Zhenli¹, YE Xuchun⁴, XU Ligang^{2,3}

(1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Coral sand is an important composition of tropical islands topsoil, and it is the premise of correctly understanding and evaluating the groundwater quality of islands to carry out the hydrochemical study of atmospheric precipitation infiltrated through sand layer. In this study, the surface sand soil layers (No. D1, D2 and D3) from three different plots of tropical islands in China were collected in August 2017. Based on the simulated rainfall experiment, the characteristics of the basic physiochemical parameters of water infiltration were analyzed. At the same time, the characteristics of hydrochemical change and main controlling process infiltrated through different sand soil layers were revealed by using hydrochemical phase diagram, visual MINTEQ hydrogeochemical simulation, indices of base exchange (IBE) calculation and Gibbs diagram. The results showed that the degree of salinization of coral sands was high. The ranges of pH values of water samples through D1, D2 and D3 were 7.92–8.81, 7.86–9.30 and 7.82–9.35, respectively, which were obviously higher than the mean value of atmospheric precipitation (6.0), and EC decreased from 48.50, 89.90 and 77.60 mS/cm to 131.4, 111.6 and 98.4 μ S/cm, respectively. The concentrations of

①基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)(XDA13010401)、国家重点研发计划项目(2016YFC0305401)和中国水利水电科学研究院重点科研专项(SD0145B302016)资助。

* 通讯作者(lihaiy@iwhr.com)

作者简介: 樊龙凤(1993—), 女, 甘肃泾川人, 博士研究生, 主要从事水资源及水环境演变研究。E-mail: fanlongfeng2018@163.com

many trace elements in the water infiltrated through D1, D2 and D3 gradually decreased with rainfall washing. Among them, Al, As, B (D1 and D2) and Cr, Fe, Pb were more difficult to be dissolved in water, which should be paid more attention. The concentrations of main ions in water stored at D1, D2 and D3 were $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ and $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{Br}^- > \text{F}^-$, and their chemical types of water were changed from Cl-Na to $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ water with rainfall elution. The controlling mechanisms of the hydrochemistry penetrating the coral sand layer included the dissolution and precipitation of carbonate, chloride and sulfate minerals, and the exchange of between $(\text{Na}^+, \text{K}^+)$ and $(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+})$ ions during precipitation infiltration. This study is of great scientific significance to guide the rational development and utilization of groundwater resources, to ensure the safety of water of residents and to maintain the ecosystem in the tropical island.

Key words: Artificial precipitation simulation; Tropical islands; Coral sand layer; Variation of water quality; Visual MINTEQ

海岛在我国广泛分布, 尤其热带岛礁密集成群, 具有重要的战略地位。我国热带海岛基本为珊瑚岛礁, 表层为形成年代晚、松散未胶结或弱胶结的珊瑚和生物碎屑砂层, 其下为珊瑚礁灰岩和珊瑚贝壳灰岩^[1]。这种土壤质地具有粗质多孔、易碎的结构特征, 岛上丰富的降水很难产生地表径流^[1], 加之砂土缺乏天然有机物, 从而形成了结构性缺水、土地贫瘠、生态脆弱的海岛水土资源环境系统。目前, 我国大部分海岛的淡水供应主要依赖远距离运水、海水淡化及通过硬化设施收集并处理的雨水^[2], 对地下水的开发利用不足。拥有稳定的天然淡水资源对海岛的开发建设至关重要, 而作为许多海岛地区重要水源之一的地下水^[3], 其对人类的有用性基本上取决于其化学特性。积极开展热带海岛入渗通过其砂质土层的水质特性研究, 对于促进海岛资源的开发利用, 保障海岛居民用水安全及生态系统维护具有重要的科学意义。

海岛地下水埋深一般较浅^[4], 其水化学成分受诸多因素控制, 包括降水组成、地层岩性、水文地质过程以及人类活动等^[5]。表层珊瑚砂土作为联系热带海岛地区水文循环和生物化学循环的纽带, 深受海洋环境和人类活动的双重影响, 高渗透性能决定了珊瑚砂土层类似于“天然砂漏”, 导致其所富含的易溶海洋盐类物质以及人为污染物质可随雨水入渗不断淋溶流失, 并迅速到达地下水面, 从而改变地下水的化学组成^[4,6]。由于海岛地区普遍缺乏足够的水资源安全管理和健全的污水排放设施, 水环境问题呈现出污染源多样化的特征, 如工农业活动、人畜粪便和家用化学品流失等造成的地下水污染现象时常发生, 使地下水水质受到了威胁^[7-9]。有研究表明, 我国某些热带海岛地下水因存在色度高、盐度高、有异味等问题而无法使用^[10]。由于海岛珊瑚砂土层受特殊成土母质影响, 其入渗水的化学特征是及早发现、治理和防范海岛地下水污染问题的基础, 在开发利用海岛淡水资源时需引起重视。

目前, 有关入渗通过海岛珊瑚砂土层的水化学特性研究较少, 在水文地质条件复杂的海岛地区开展影响因素与过程研究更是鲜见。本研究以我国热带海岛典型珊瑚砂土层为研究对象, 通过人工降雨模拟试验, 分析渗流通过珊瑚砂土水样的水质变化特征, 并选用水化学相图、Visual MINTEQ 水文地球化学模拟^[11]、碱基交换指数^[12]计算和 Gibbs 图解^[13]等方法, 探讨通过珊瑚砂土层水样的水化学特征变化及主要控制因素与关键过程, 以期海岛地下水资源的合理开发与利用提供科学保障和参考依据。

1 材料与方法

1.1 砂土特性与机械组成

本研究选择我国典型热带自然珊瑚灰沙岛进行砂土采集。该海岛处于热带海洋性季风气候区, 多年平均气温为 26.5 °C, 平均降水量为 1 500 mm 左右, 雨季为每年 5—10 月^[14]。其表层珊瑚砂剖面示意图如图 1 所示。采集近海滩地、人工扰动较大的平地、林丛地(近年人工扰动小)3 种样地表层砂土(编号分别为 D1、D2、D3), 将其带回实验室自然风干、分析并用于开展模拟试验。

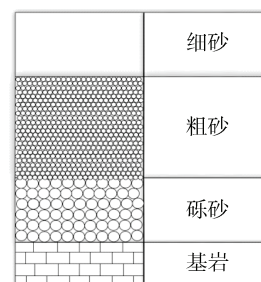


图 1 热带海岛表面砂层剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sand soil layer on surface of tropical island

表 1 为珊瑚砂土的基本理化性质。由此可以看出, 珊瑚砂土为高盐碱化土, 特别是 Ca、Mg 含量最

高，这主要与其成土母质多为珊瑚、贝壳砂，主要化学成分是 CaCO_3 ^[15]有关。由于珊瑚砂土都还未充分受

生物质积累和分解、盐渍和脱盐、磷的富集和淋溶等成土过程^[14,16]，因此其还不能称为严格意义上的土壤。

表 1 砂土主要理化特性(mg/L)
Table 1 Main physiochemical characteristics of coral sand soil

项目	Ca	Mg	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	pH
砂土	24 700	4 760	117	0.667	1.08	0.915	1.98	48	3.79	0.221	0.795	12.7	9.56

采集的砂土样中 >2 mm 的颗粒含量相对较高，为保持其原始状态，仅剔除极个别巨砾。参照 SL237—1999《土工试验规程》^[17]，按照以下粒组^[18]：>2、2~0.5、0.5~0.25、0.25~0.125、0.125~0.063 mm 和<0.063 mm，对样品分次取样筛分，精度 0.01 g，每组样品筛分前后样品总量误差必须小于 1%。通过颗粒分析，发现 3 种样地砂土均以粒径 >0.25 mm 的粗粒为主，粒径 <0.25 mm 的细粒含量较少。根据 GBJ145—90《土的分类标准》^[19]和 GB50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[20]，将 D1、D2 和 D3 分别归类为粗砂、砾砂和中砂。

1.2 试验设计与样品分析

根据热带海岛表层为珊瑚砂土层特点，本试验装置(图 2)采用高 40 cm，内部直径 5 cm 的有机玻璃土柱，设计珊瑚砂柱长为 30 cm，采用分层装填法，每装一层(约 5 cm)捣实一次，并计算容重，以确保砂柱装填均匀。D1、D2 和 D3 砂柱装填容重分别约为 1.40、1.53 和 1.35 g/cm³，介于测定的珊瑚砂堆积密度 1.35~1.55 g/cm³。砂柱上下各铺一层玻纤棉，防止水流冲散砂样。利用校正好的蠕动泵(BL100-pump)，开展连续人工降雨(雨强为 60 mm/h)模拟试验，并分别于 5、10、20、30、40、50、60、80、100、120、160、200、240、300、420、600、840、1 320、1 800、2 280、2880 min 采集水样，以分析水质的时间变化特征。试

验设置 3 组重复，每批试验按照相同步骤做两个空白样，以减少样品误差。

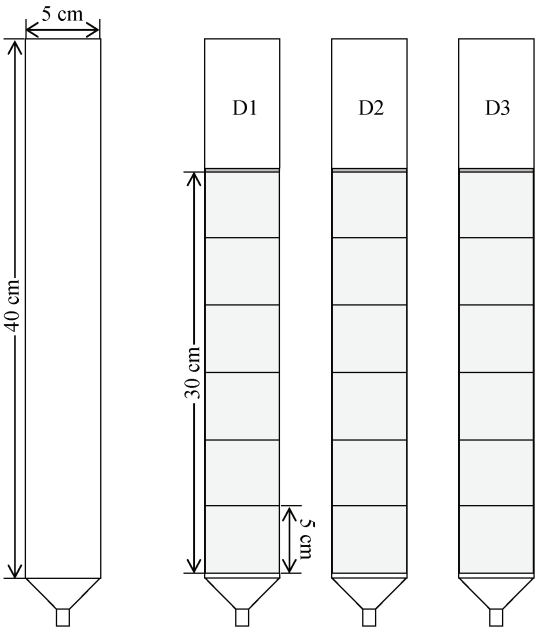


图 2 人工降雨模拟砂柱装填平面示意图
Fig. 2 Planar diagram of sand column filling in artificial rainfall simulation

由于该区域降水主要靠对流雨和台风，人类活动对降水的污染可忽略不计，雨水水质纯净，因此，试验用水选用去离子水，其主要理化指标见表 2。

表 2 试验用去离子水及热带海岛降水主要理化特性(mg/L)
Table 2 Main physiochemical characteristics of experimental de-ionized water and tropical island precipitation

样品	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	pH	TDS
海岛降水	0.0006	0.0074	0.0083	0.0316	0.0653	0.3521	0.2761	6.87	23.32
去离子水	n.a.	0.001	0.041	n.a.	1.73	1.732	2.039	6.78	3.74

注：n.a.指未检测出该项目数据；下同。

根据 GB/T 5750—2006《生活饮用水标准检验方法》^[21]收集和储存水样。采用台式水质分析仪(innoLab 20P 和 innoLab 20C)测定水样的 pH、电导率(EC)、盐度(SAL)、总溶解固体(TDS)和水温(T)；水的碱度(HCO₃⁻和 CO₃²⁻)采用碱度计(德国 Aquanmerck 公司)滴定测定，精度 0.1 mmol/L；阴离子(F⁻、Cl⁻、

NO₂⁻、SO₄²⁻、Br⁻、NO₃⁻和 H₂PO₄⁻)采用离子色谱法(ics-2100)进行测定，检出限为 0.001 mg/L；阳离子(Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺)及其他微量元素(Al、As、B、Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Li、Mn、Mo、Ni、P、Pb、Se、Si、S、Sr、V 和 Zn)采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES: Optima 5300DV，美国 PerkinElmer

公司)完成检测,检出限为 0.001 mg/L,仪器 1 h 内相对标准偏差 $\leq 0.5\%$ 。检测时先对每批试验的两个空白样进行测定,结果取均值。测定样品时,每 20 个样重复 1 次,以验证结果的稳定性。最后将测定结果扣除空白作为样品值。为了从整体上反映人工降雨条件下入渗通过不同砂土层的水质状况,将每一砂柱在不同时间采集的所有水样的实测数据求平均值。

1.3 研究方法

本研究选用水化学相图、Visual MINTEQ 水文地球化学模拟、碱基交换指数计算以及 Gibbs 图解等方法揭示入渗通过砂土层水的水化学特征及主要控制过程。

1) Visual MINTEQ 水文地球化学模型。该模型基于化学平衡常数和较全面的热力学反应数据库,定量计算水溶液中矿物质的形态、溶解度以及固相和溶解相的平衡^[22],并可简单快速地预测所有输入离子的固相饱和度(saturation index, SI),从而指示地下水中哪种溶质发生了溶解和沉淀反应。为评价入渗通过珊瑚砂层水样的潜在化学反应,本研究采用地球化学模型 Visual MINTEQ 3.00 计算了水中矿物相的饱和指数。以 25℃ 被测水样中离子的摩尔浓度作为输入成分,输入分析水样各自对应的 pH,运行并获得输出文件。与固体相比,若 SI>0,溶液过饱和;若 SI=0,溶液处于平衡状态;若 SI<0,则溶液不饱和。

2) 碱基交换指数。碱基交换指数(indices of base exchange, IBE)^[23]主要用于理解发生离子交换的化学反应,计算方法如下:

$$IBE = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-}} \quad (1)$$

式中: Cl⁻指所有卤族元素(F、Cl、Br、I、At、Ts)之和; Na⁺和 K⁺代表所有碱金属元素(Li、Na、K、Rb、Cs、Fr)之和,以质量浓度计。当水中 IBE<0 时,表示地下水中的 Ca²⁺或 Mg²⁺与含水层介质中的 Na⁺和 K⁺发生交换;如果 IBE>0,则表示地下水与其围岩之间存在反向离子交换。

3) Gibbs 比。通过 Gibbs 图解可以直观反映水样中 TDS 与占优势的阴阳离子比值的关系,进而描述水化学组成以及地层岩性与水化学之间的关系^[24]。

Gibbs 比的计算方法如下:

$$\text{Gibbs 比 (阳离子)} = \frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+}} \quad (2)$$

$$\text{Gibbs 比 (阴离子)} = \frac{Cl^-}{Cl^- + HCO_3^-} \quad (3)$$

当 $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ 或 $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ 比值大于 0.5,且 TDS 含量较低时,水化学组分主要受大气降水影响;当 $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ 或 $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ 比值小于 0.5,且 TDS 含量中等时,水化学组分主要受水岩相互作用影响;当 $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ 或 $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ 比值大于 0.5,且 TDS 含量较大时,水化学组分主要受蒸发结晶作用影响^[25]。

2 结果与讨论

2.1 入渗通过珊瑚砂土层水样 pH 和 EC 动态变化

本研究结果表明,入渗通过不同样地砂土层水样的 pH 随降雨历时呈先快速上升、后缓慢变化至平稳的趋势(图 3)。入渗通过 D1、D2 和 D3 的水样 pH 分别介于 7.92~8.81、7.86~9.30 和 7.82~9.35,与试验用水(pH 6.78)和大气降水(pH 6.0)pH 均值^[26]相比碱性增加,甚至部分水样超过了世卫组织(WHO)^[27]规定的饮用水 pH 安全限值(6.5~8.5)。以上结果说明珊瑚砂土为高盐碱化土。

同时研究发现,降雨初期,入渗通过 D3(林丛地)的水样 pH 最小。这与近年来该样地受人为干扰小且林下植被修复后土壤微生物的改善有关,如频繁的土壤微生物活动有助于改善土壤盐碱化状况,并可降低其 pH^[14,28]。

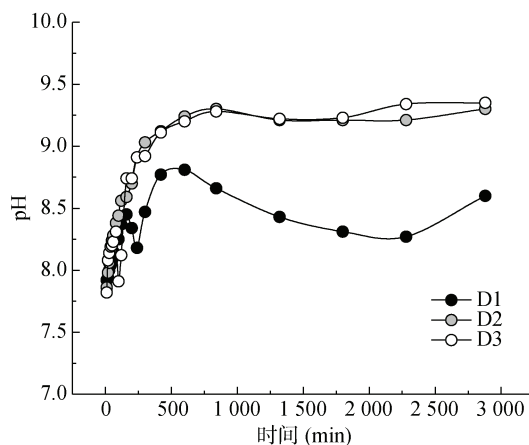


图 3 入渗通过不同珊瑚砂土层水样 pH 随降雨历时的变化

Fig. 3 pH variations of water samples infiltrated through different coral sand soil layers with rainfall duration

通过重复试验,不同时间入渗通过 D1、D2 和 D3 的水样电导率变异系数分别介于 8.55%~44.68%、8.46%~23.53% 和 2.41%~28.67%,根据变异性分级标准^[29],均属弱或中等变异性,说明试验重现性较好。人工降雨条件下,入渗通过不同样地

砂土层的水样电导率呈先剧烈后缓慢、并在短时间内达到平稳状态的下降趋势(图 4)。降雨初期,入渗通过 D1、D2、D3 的水样电导率分别为 48 496.7、89 900、77 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$,并各自在 300、200、240 min 时降到了 1 682.3、1 428.7、1 952.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$,分别在初始水平基础上降低了 96.53%、98.41% 和 99.87%;累计降雨 48 h 后,入渗通过 D1、D2、D3 水样的电导率分别为 131.4、111.6、98.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。由筛分结果可知,组成砂土的颗粒中黏粒含量极少,加之珊瑚砂土有机质含量低,导致它对各种盐分离子的吸附性能较差。因此,累积降雨条件下,珊瑚砂土层中的盐分不断淋溶流失,淋溶水质均可由盐水变为淡水。然而,影响珊瑚砂土层含盐量大小的因素有很多,比如气候、植被、水文、人类活动等,是各种环境因子影响的综合反映。我国热带海岛地区常年蒸发旺盛,尤其在持续干季,埋藏较浅(一般小于 2 m)^[4]的海岛地下水会不断向地表运移,严重时会引起含水层疏干,导致咸水反渗盐化珊瑚砂,进而对岛上人类和动植物的生存环境构成威胁。

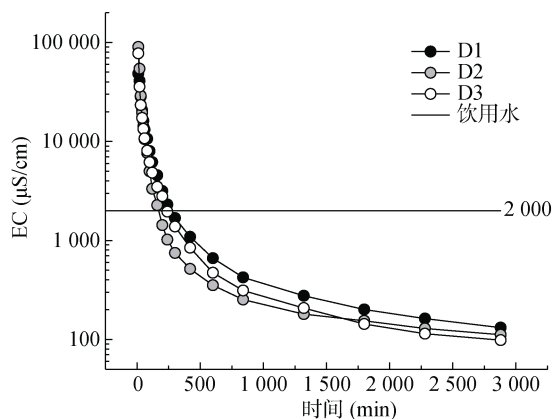


图 4 入渗通过不同珊瑚砂土层的水样 EC 值随降雨历时变化

Fig. 4 EC variations of water samples infiltrated through different coral sand soil layers with rainfall duration

2.2 入渗通过珊瑚砂土层水样微量元素浓度变化

微量元素是水质综合评价的重要内容之一。虽然微量元素在水体中的含量甚微,但若在水质检测和评估时忽略它们的存在,就有可能给人类健康带来潜在风险^[30]。本研究从检测出的 20 种微量元素中选取在 WHO 饮用水标准^[27]中有规定限值的 14 种微量元素(Al、As、B、Ba、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn)以及 P 元素浓度进行了对比分析。由表 3 可知,本研究入渗通过不同珊瑚砂土层的水样中除 Ba、Cu、Cd(D3)外,其余微量元素浓度最大值均超

出了饮用水标准值,但只有 D3 水样中的 Al 元素浓度最小值始终未降到饮用水标准值;从微量元素浓度均值来看,入渗通过 3 种类型样地水样中的 Ba、Cd、Cu、Mn、Mo、Ni、Se、Zn、B(D3)元素浓度都达到了饮用水标准,相比之下,微量元素 Al、As、B(D1 和 D2)、Cr、Fe、Pb 较难溶于水,应该引起重视。此外,入渗通过 D1、D2 和 D3 的水样中 P 元素浓度最大值分别为 2.062、0.877、1.778 mg/L,明显高于大气降水值(0.02 mg/L)^[31]。龚子同等^[31]研究发现,海岛土壤浅层地下水中 P 元素含量为 0.2 ~ 4.9 mg/L,本研究结果在其范围内,说明热带海岛入渗通过珊瑚砂土层的水中 P 元素含量增加。这与热带海岛频繁的鸟类活动密切相关,由于海鸟粪中富含 P 等元素,海岛珊瑚砂经过脱盐阶段,在生物积累、淋溶、磷素富集、积盐脱盐过程等作用下,形成了以磷质石灰土为主的珊瑚砂土,因此鸟粪中富含的 P 元素是砂土中富含磷矿的主要来源^[31,15]。

2.3 入渗通过珊瑚砂土层水样主要离子化学特征

我国热带海岛远离大陆,受热带海洋性气候和海水等因素影响,珊瑚砂土层盐碱化程度高。由表 4 可知,入渗通过 D1、D2、D3 的水样 TDS 变化范围分别为 24 246.67 ~ 65.70、44 933.30 ~ 55.80、38 766.67 ~ 49.20 mg/L,平均值分别为 5 175.98、6 004.45、4 903.61 mg/L。当 TDS < 600 mg/L 时,水质最好,当 TDS > 1 000 mg/L 时,饮用水水质较差^[27]。因此,入渗通过珊瑚砂土层的水样 TDS,不适合饮用。由各离子浓度均值可推断出,整体上不同珊瑚砂土中的主要阳离子和阴离子含量大小分别为: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{Br}^- > \text{F}^-$ 。根据 WHO 标准^[27],入渗通过 D1、D2 和 D3 水中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Br^- 和 NO_3^- 最小浓度值都在饮用水标准范围之内,但最大值远超过饮用水标准。虽然 K^+ 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 没有规定允许限值,但浓度太高也会影响水质,严重时危及人体健康。因此,入渗通过珊瑚砂土层的水样 TDS 主要受 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Br^- 、 HCO_3^- 和 F^- 等控制,而这些离子恰好是海水的主要组分,这说明海水混合作用深刻影响着海岛表层珊瑚砂的化学组成。同时,珊瑚砂土中碳酸盐类矿物(如文石、方解石)的溶解也是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 等的主要自然来源;而淋溶于水中的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 等营养盐类物质主要是人为原因所致。

由图 5 可知,在连续 48 h 的降雨过程中,入渗通过不同珊瑚砂土层的水样中主要离子浓度都呈现

表 3 入渗通过不同珊瑚砂土层的水样中微量元素浓度的最大值、最小值和平均值及饮用水标准(mg/L)

Table 3 Maximum, minimum and average concentrations of trace elements in water samples infiltrated through different coral sand soil layers and drinking water standard

样品	特征值	Al	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Zn	P
D1	最大值	10.954	0.195	4.424	0.249	0.011	0.523	1.175	5.916	0.363	0.090	0.332	0.193	0.147	10.342	2.062
	最小值	0.078	n.a.	0.032	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.001	n.a.	n.a.	n.a.	0.002
	平均值	2.089	0.042	1.320	0.028	0.001	0.136	0.122	0.641	0.038	0.024	0.036	0.015	0.034	0.815	0.273
D2	最大值	11.686	0.408	2.367	0.169	0.013	0.951	0.505	2.560	0.146	0.128	0.179	0.104	0.129	1.394	0.877
	最小值	0.087	n.a.	0.018	n.a.	n.a.	n.a.	0.001	0.001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.011
	平均值	2.239	0.041	0.687	0.027	0.001	0.159	0.093	0.450	0.022	0.023	0.021	0.011	0.025	0.242	0.197
D3	最大值	10.189	0.331	1.623	0.169	0.003	0.744	0.434	2.224	0.119	0.136	0.089	0.056	0.120	1.467	1.778
	最小值	0.111	0.001	0.003	n.a.	n.a.	0.001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.001	n.a.	n.a.	n.a.	0.022
	平均值	1.830	0.048	0.439	0.025	—	0.140	0.077	0.358	0.020	0.024	0.019	0.013	0.024	0.251	0.285
WHO ^[27]		0.1	0.01	0.5	1.3	0.003	0.05	2	0.3	0.1	0.07	0.07	0.01	0.04	1	—

表 4 入渗通过不同珊瑚砂土层的水样中主要离子浓度的最大值、最小值和平均值及饮用水标准(mg/L)

Table 4 Maximum, minimum and average concentrations of main ions in water samples infiltrated through different coral sand soil layers and drinking water standard

样品	特征值	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	TDS
D1	最大值	349.75	10 413.66	619.74	1 054.90	15.34	16 530.76	2 811.54	66.02	816.00	889.44	n.a.	24 246.67
	最小值	0.90	6.81	10.91	3.70	0.65	10.07	7.55	n.a.	3.67	403.92	n.a.	65.70
	平均值	78.43	2 083.01	102.88	222.67	4.21	3593.11	635.32	13.36	217.62	603.64	—	5 175.98
D2	最大值	448.70	16 310.00	755.00	1 617.00	71.95	29 447.25	4311.43	111.64	1 474.10	618.34	345.72	44 933.33
	最小值	1.32	5.65	7.17	3.19	0.71	12.14	7.19	n.a.	3.65	12.20	n.a.	55.80
	平均值	71.76	2 301.44	121.43	243.66	2.18	4 186.02	786.15	16.55	288.09	370.49	56.74	6 004.45
D3	最大值	476.77	13 706.67	561.49	1 387.33	15.53	26 193.85	3 154.65	59.62	729.13	718.00	335.56	38 766.67
	最小值	0.65	5.00	7.37	3.20	0.63	4.92	4.24	n.a.	1.01	38.65	n.a.	49.20
	平均值	71.79	1 925.10	87.85	204.41	3.97	3 653.91	510.28	9.41	127.49	344.36	123.95	4 903.61
WHO		—	200	200	150	1.5	250	250	0.01	50	—	—	1 000

出先剧烈下降、后缓慢变化并逐渐趋于平稳状态的趋势。本研究发现,入渗通过 D1 的水样离子浓度出现波动上升现象,是因为珊瑚砂虽然属于粗颗粒砂土,但其具有颗粒大小不一,且内、外孔隙丰富的微观结构特征,这就导致砂柱内必然会有优先流产生,从而造成水中溶解物的浓度会出现峰值。根据 WHO 标准^[27],入渗通过 D1(图 5A、D)、D2(图 5B、E)和 D3(图 5C、F)的水样中阴阳离子浓度都达到饮用水标准所需降雨历时分别为 2 880、2 880、600 min,其中阳离子浓度达到饮用水标准的先后顺序为 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺,而阴离子没有统一规律。不同的是,入渗通过 D1(图 5A)、D2(图 5B)和 D3(图 5C)的水样中占优势的阳离子分别在累积降雨 1 800、2 280、1 800 min 后由 Na⁺变为 Ca²⁺,且 Ca²⁺ 浓度基本保持不变,而其余阳离子浓度继续保持略微下降趋势。入渗通过 D1(图 5D)、

D2(图 5E)和 D3(图 5F)的水样中占优势的阴离子分别早在累计降雨 100、120、80 min 及以后由 Cl⁻ 变为 HCO₃⁻ 或 CO₃²⁻。其中,入渗通过 D1 的水中始终未检测到 CO₃²⁻,入渗通过 D2 和 D3 的水样分别在累计降雨 840 和 240 min 后检测到了 CO₃²⁻。此外,D1(图 5D)、D2(图 5E)和 D3(图 5F)分别在累计降雨淋洗 2 280、2 280、240 min 之后,在水样中也检测不到 Br⁻。

2.4 入渗通过珊瑚砂土层水样水化学类型

利用水化学相图可以判断水样主要离子组成变化,体现不同水样的化学组成特征,从而辨别其控制端元。如图 6 所示,降雨初期,入渗通过不同珊瑚砂土层的水样化学类型主要为 Cl-Na 水。随着降雨的不断冲刷,珊瑚砂土层所含盐分不断被淋失,水化学类型也在不断发生变化。其中,入渗通过 D1 的水样水化学类型变化情况为:Cl-Na 水→HCO₃⁻·Cl-Na 水→

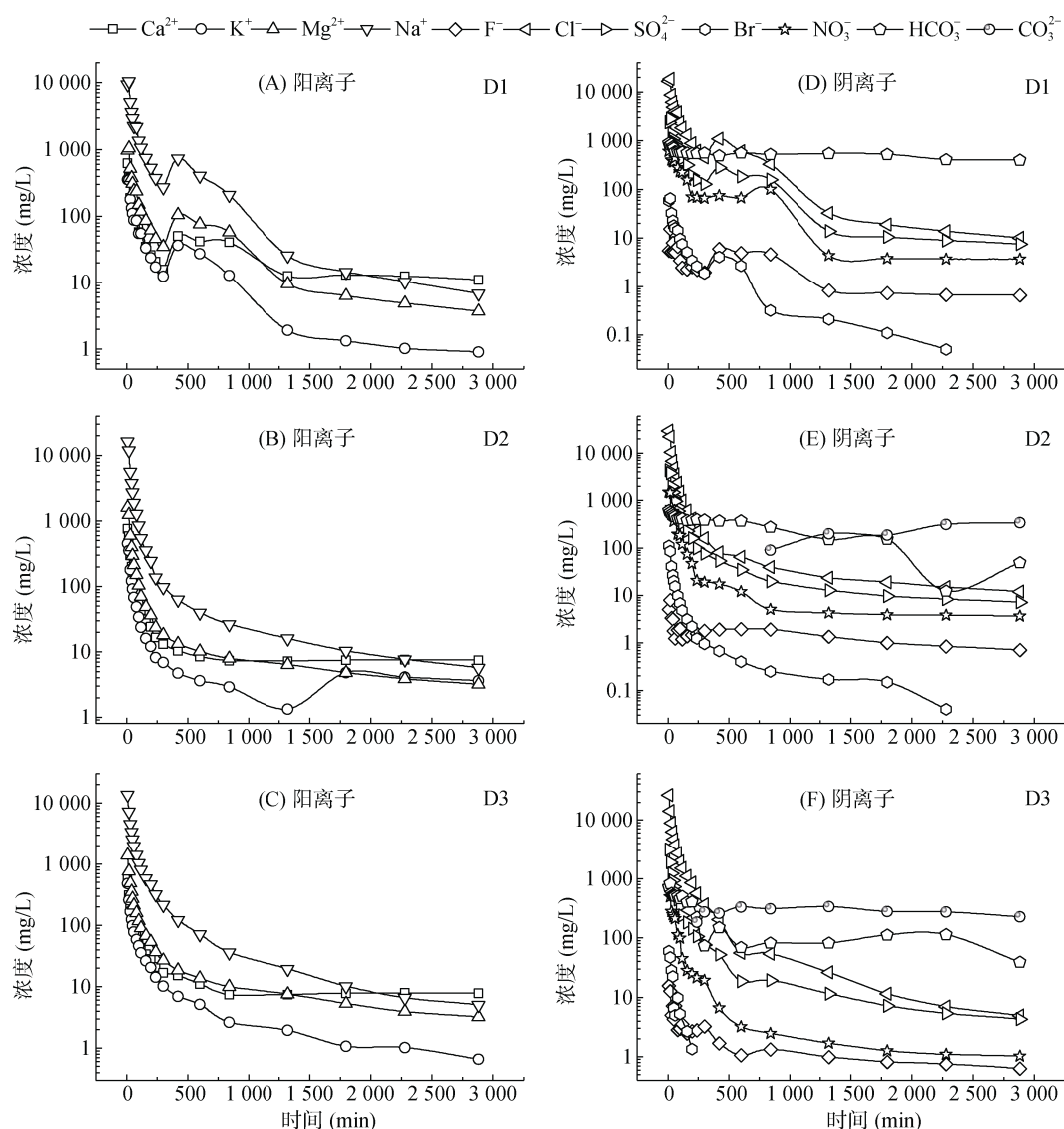


图 5 入渗通过不同珊瑚砂土层的水样中主要离子浓度随降雨历时变化

Fig. 5 Concentration variations of main ions in water samples infiltrated through different coral sand soil layers with rainfall duration

$\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水 $\rightarrow$ $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水 $\rightarrow$ $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水；入渗通过 D2 和 D3 水样水化学类型变化情况为： $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ 水 $\rightarrow$ $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ 水 $\rightarrow$ $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+$ 水 $\rightarrow$ $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水 $\rightarrow$ $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水。总体来说，人工降雨条件下，入渗通过不同珊瑚砂土层水样水化学类型都由 $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ 水转变为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水。入渗通过砂土层水样水化学类型发生这一变化，主要与珊瑚砂土的成岩环境、成土母质以及所含矿物溶解度密切相关。珊瑚砂土为海相沉积物，盐碱化程度高，主要矿物组分为富含钙镁的碳酸盐岩，特别是海水作用导致土层中的 Na^+ 和 Cl^- 含量最高。在降雨淋溶作用下，珊瑚砂土层中的各种盐类依次溶出，最先是氯化物溶出，形成高矿化度的 $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ 水；当渗入水继续冲淡岩层时，氯化物不断被消耗，则此时可形成矿化度

较低的 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ 水或 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+$ 水；当氯化物几乎全部被渗入水从珊瑚砂土层中驱替后，继续渗入则会发生碳酸盐的溶解和淋滤作用，从而形成低矿化度的 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水或 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 水。

2.5 入渗通过珊瑚砂土层水样水化学控制过程

表 5 列出了基于 Visual MINTEQ 模型和碱基交换指数方程的计算结果。就钙、镁矿物而言，入渗通过不同砂土层的水样中都含有大量文石 [CaCO_3]、方解石 [CaCO_3]、白云石 (有序) [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]、碳酸钙镁石 [$\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$]、菱镁矿 [MgCO_3] 和球霏石 [CaCO_3 , 多晶]，其中，入渗通过 D1 的水样中矿物 SI 平均值分别为 1.86、2.01、4.73、5.84、1.58 和 1.44；入渗通过 D2 的水样中矿物 SI 平均值分别为 1.86、2.00、4.68、5.69、1.53 和 1.44；入渗通过 D3 的水样中矿

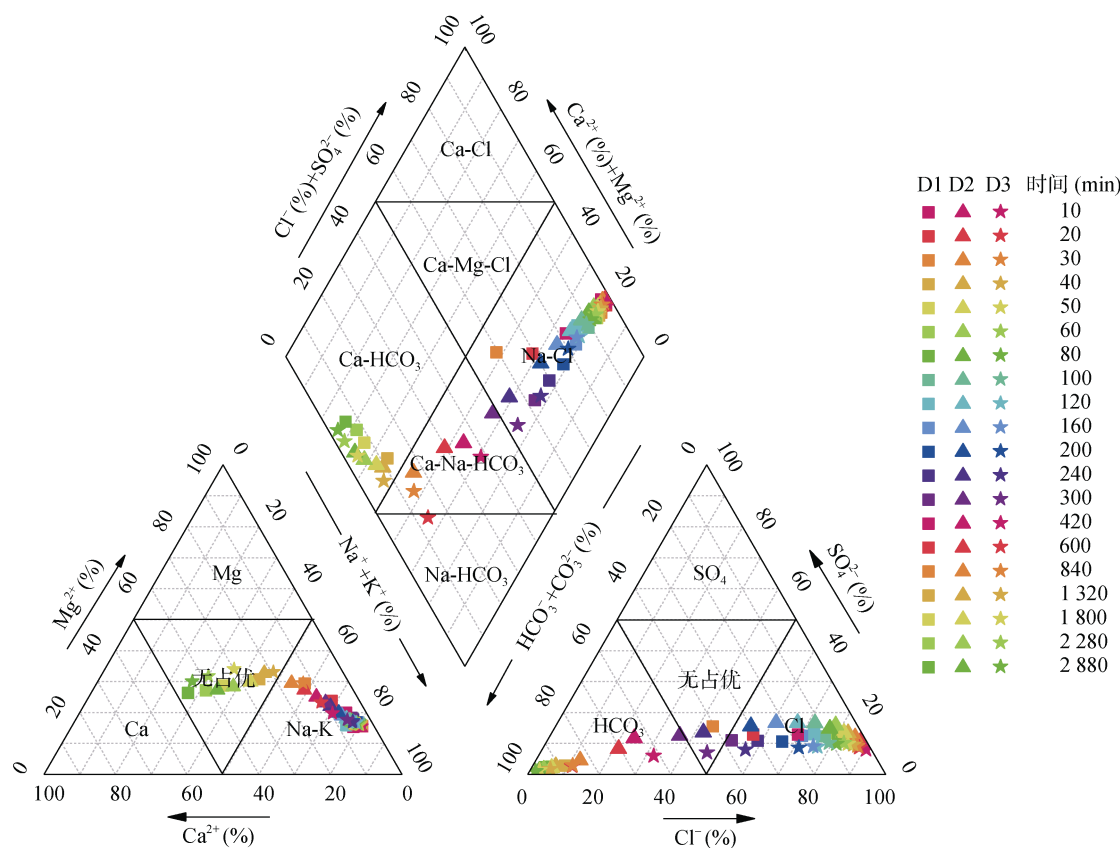


图 6 随降雨历时入渗通过不同珊瑚砂土层水样的水化学相图

Fig. 6 Chemical phase diagrams of water samples infiltrated through different coral sand layers with rainfall duration

表 5 入渗通过不同珊瑚砂土层的水样矿物饱和指数(SI)和碱基交换指数(IBE)统计

Table 5 Statistics of mineral saturation index (SI) and indices of base exchange (IBE) of water samples infiltrated through different coral sand layers

指数	矿物	D1			D2			D3			去离子水
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
SI	文石	2.66	1.27	1.86	2.70	1.35	1.86	2.53	1.36	1.82	-2.37
	水纤菱镁矿	-1.52	-5.17	-2.72	-1.32	-3.64	-2.45	-1.46	-3.55	-2.44	-33.74
	水镁石	-3.51	-5.59	-4.34	-3.81	-4.34	-4.01	-3.74	-4.87	-4.03	-20.62
	方解石	2.80	1.41	2.01	2.84	1.49	2.00	2.68	1.51	1.96	-2.23
	白云石(无序)	5.70	2.39	4.18	5.89	2.76	4.13	5.63	2.80	4.11	-14.79
	白云石(有序)	6.25	2.94	4.73	6.44	3.31	4.68	6.18	3.35	4.66	-14.24
	泻利盐	-2.87	-7.71	-4.87	-2.55	-8.32	-5.48	-2.73	-8.57	-5.54	-19.75
	萤石, 氟石	0.33	-3.90	-1.83	-0.09	-4.54	-2.56	0.48	-4.65	-2.34	-10.90
	石膏	-1.00	-5.18	-2.97	-0.70	-5.96	-3.54	-0.94	-6.19	-3.66	-7.35
	岩盐	-2.68	-9.08	-5.26	-2.28	-9.37	-5.91	-2.40	-9.84	-5.77	-13.42
	碳酸钙镁石	8.79	1.65	5.84	9.30	2.52	5.69	8.84	2.60	5.72	-42.62
	水菱镁矿	1.45	-8.05	-2.01	2.00	-5.77	-1.88	1.50	-5.64	-1.81	-77.26
	氯化钾	-3.61	-9.30	-5.94	-3.31	-8.82	-6.36	-3.32	-9.79	-6.32	-21.24
	石灰	-19.87	-21.17	-20.53	-20.02	-20.31	-20.16	-19.94	-21.15	-20.23	-26.30
	菱镁矿	2.34	0.38	1.58	2.45	0.63	1.53	2.35	0.64	1.55	-13.17
	芒硝	-2.50	-11.17	-5.94	-1.98	-11.98	-6.91	-2.24	-12.36	-6.85	-18.78
	泡碱	-2.42	-8.17	-4.63	-2.11	-8.17	-5.04	-2.30	-8.28	-4.90	-17.34

续表 5

指数	矿物	D1			D2			D3			去离子水
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
	三水菱镁矿	-0.45	-2.41	-1.21	-0.34	-2.16	-1.26	-0.44	-2.15	-1.24	-15.96
	方镁石	-8.00	-10.07	-8.82	-8.29	-8.82	-8.50	-8.23	-9.35	-8.51	-25.10
	氢氧钙石	-9.87	-11.18	-10.53	-10.03	-10.32	-10.16	-9.95	-11.16	-10.24	-16.30
	无水芒硝	-3.93	-12.61	-7.37	-3.41	-13.42	-8.34	-3.67	-13.79	-8.29	-20.22
	水碱	-4.36	-10.12	-6.58	-4.06	-10.12	-6.98	-4.24	-10.23	-6.84	-19.28
	球霰石	2.24	0.84	1.44	2.27	0.93	1.44	2.11	0.94	1.40	-2.80
IBE		2.1	0.01	0.73	2.6	0.01	0.7	3.12	-0.05	0.93	-

物 SI 平均值分别为 1.82、1.96、4.66、5.72、1.55 和 1.40，这充分说明组成砂土的主要矿物组分是文石、白云石和方解石等碳酸盐矿物，主要化学组分为 CaCO_3 [32]。根据 SI 最小值(表 5)可知，以上 6 种矿物在入渗通过不同砂土层的所有水样中都为饱和状态，甚至严重过饱和(根据 SI 最大值)，这主要与珊瑚砂土本身的理化性质有关。一方面，珊瑚砂土主要由弱(无)胶结的粗粒松散沉积物组成，渗透性强，吸附性能较差；另一方面，其化学成分深受不同生物及矿物组分制约[33]，例如文石质的造礁岩生物(如珊瑚、仙掌藻、多孔螅、多毛类等)和方解石质生物(如牡蛎、浮游有孔虫等)的 Ca 含量很高，一般>37%；镁方解石质生物(如珊瑚藻、软珊瑚古针、棘皮动物、苔藓虫、底栖有孔虫等)含 Mg 高，Ca 含量稍低，约 27%~36%。因此，在充分淋溶作用下，这些矿物会在短时间内被大量析出，从而导致其 SI 值出现严重过饱和现象。

入渗通过 D1(图 7A)、D2(图 7B)和 D3(图 7C)的水样中，以上几种矿物的 SI 值随降雨历时整体上呈减小趋势。不同的是，入渗通过 D1 和 D2 的水样中矿物 SI 值在降雨初期出现再次增大的现象，这主要与降水在多孔珊瑚砂层中的渗流机制和饱和状态密切相关。筛分试验结果表明，D1、D2 和 D3 分别为粗砂、砾砂和中砂。相比较而言，D2 颗粒最粗，渗入水通透性最好，而 D1 和 D3 则对水流具有较大的阻滞作用。珊瑚砂土颗粒大小不一会导致砂柱内部孔隙分布不均，流经较大孔隙的水流(也称优先流)会最先溶出部分以上矿物，待整个砂柱被入渗水完全浸润饱和时，同类矿物会再次被析出，从而导致这些矿物的 SI 值在整体减小的过程中出现再次增大现象。

除碳酸盐以外，珊瑚砂土层还含有少量硅酸盐。基于硅酸盐和碳酸盐风化循环反应，文石、方解石、白云石、碳酸钙镁石、菱镁矿和球霰石可以在水中沉淀出来，其基本化学反应如下：①二氧化碳在水中溶

解形成碳酸： $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ ；②碳酸在风化过程中分解硅酸盐岩石并向地下水释放阳离子： $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{硅酸盐矿物} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{阳离子}(\text{K}^+、\text{Na}^+、\text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+} \text{等}) + \text{黏土}$ ；③溶解物之间的反应产生新的固体，在风化环境中比原始基岩矿物更稳定。例如，在珊瑚砂地层地下水中， Ca^{2+} 和 HCO_3^- 反应生成方解石： $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。

基于 Visual MINTEQ 模型计算结果，硅酸盐矿物的溶解和文石、方解石、白云石等碳酸盐矿物的沉淀可能是影响入渗通过珊瑚砂土层水样化学组成的重要机制之一。而其他钙、镁矿物都不饱和，水纤菱镁矿 $[\text{Mg}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ 、水镁石 $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ 、泻利盐 $[\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$ 、萤石 $[\text{CaF}_2]$ 、石膏 $[\text{CaSO}_4]$ 、水菱镁矿 $[\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ 、石灰 $[\text{CaO}]$ 、三水菱镁矿 $[\text{Mg}_5(\text{HCO}_3)(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ 、方镁石 $[\text{MgO}]$ 和氢氧钙石 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 等矿物的 SI 值均小于 0(表 5)。另外，岩盐 $[\text{NaCl}]$ 、芒硝 $[\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}]$ 、泡碱 $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}]$ 、无水芒硝 $[\text{Na}_2\text{SO}_4]$ 和水碱 $[\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 等钠矿物以及岩盐 $[\text{KCl}]$ 也不饱和。因此，碳酸盐矿物(不包括碳酸钠和碳酸钾)的沉淀以及氯化物和硫酸盐矿物的溶解度深刻影响着入渗通过珊瑚砂土层水样的化学组成。

地下水与其围岩环境之间的离子交换对于了解地下水中的溶质来源也很重要[33]。本研究结果表明，珊瑚砂中富含 Na、K、Ca、Mg 等组分。入渗通过 D1、D2 和 D3 水样的 IBE 值变化范围分别为 2.1 ~ 0.01、2.6 ~ 0.01、3.12 ~ -0.05，平均值分别为 0.73、0.7、0.93(表 5)。入渗通过不同砂土层水样的 IBE 值基本为正(图 7D)，表明在降雨入渗过程中，已经淋溶于水体中的 Na^+ 和 K^+ 与珊瑚砂土层中还未彻底溶解的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的交换很普遍。同时发现，入渗通过不同珊瑚砂土层的水样，其 IBE 值都随降雨历时的延长在逐渐减小，并趋于 0，表明阳离子交换作用

在减弱,这是因为珊瑚砂土中溶解能力相对较强的海洋盐类物质(Na^+ 和 K^+)随降雨冲刷最先被淋失,降雨后期其淋溶水化学类型几乎完全受制于矿物沉淀和溶解过程,水化学组分继而被碳酸盐矿物中溶解出来

的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等替代。由此可见,若是在珊瑚砂土含水层的一个完整的地下水循环系统中,阳离子交换作用也是影响其地下水化学类型的主要控制机制之一。

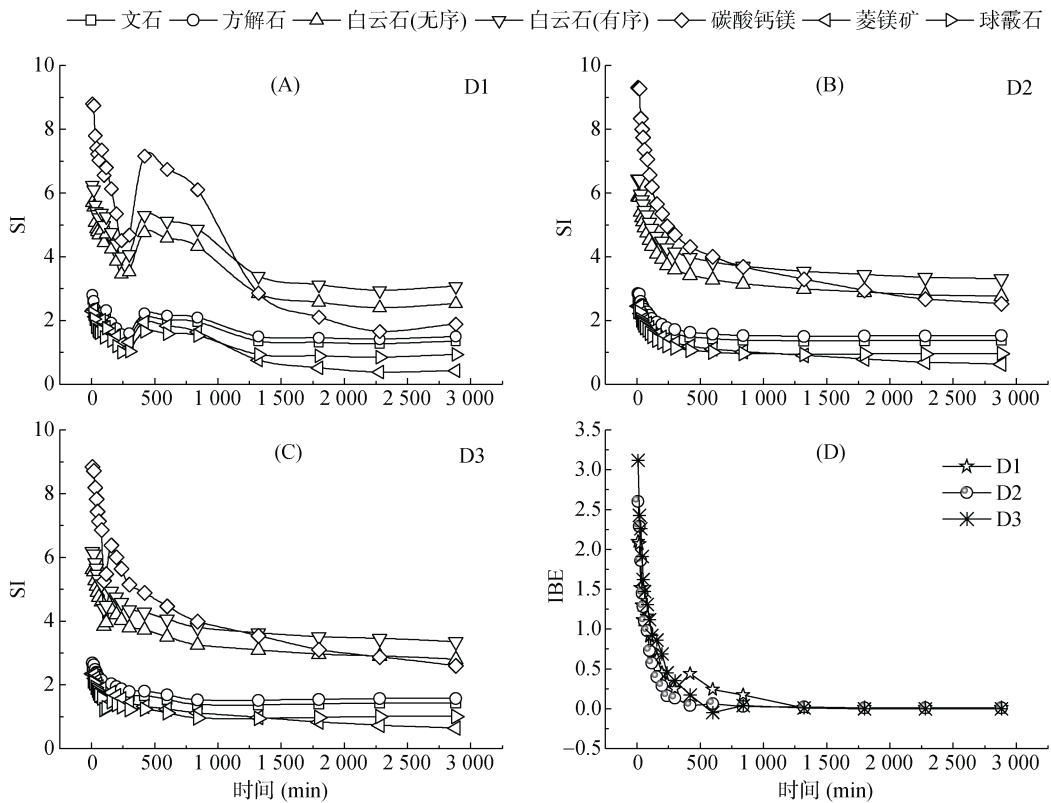


图 7 入渗通过不同珊瑚砂土层的水样中主要矿物饱和指数(SI)和碱基交换指数(IBE)随降雨历时变化
Fig. 7 Variations of main mineral SIs and IBEs in water samples infiltrated through different coral sand soil layers with rainfall duration

由图 8 可知, D1、D2 和 D3 分别在降雨 300、240、120 min 之前, 其淋溶水样主要受蒸发结晶作用

影响, $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值都接近于 1, $\text{TDS} > 1\,000\text{ mg/L}$, 其中最大的 TDS

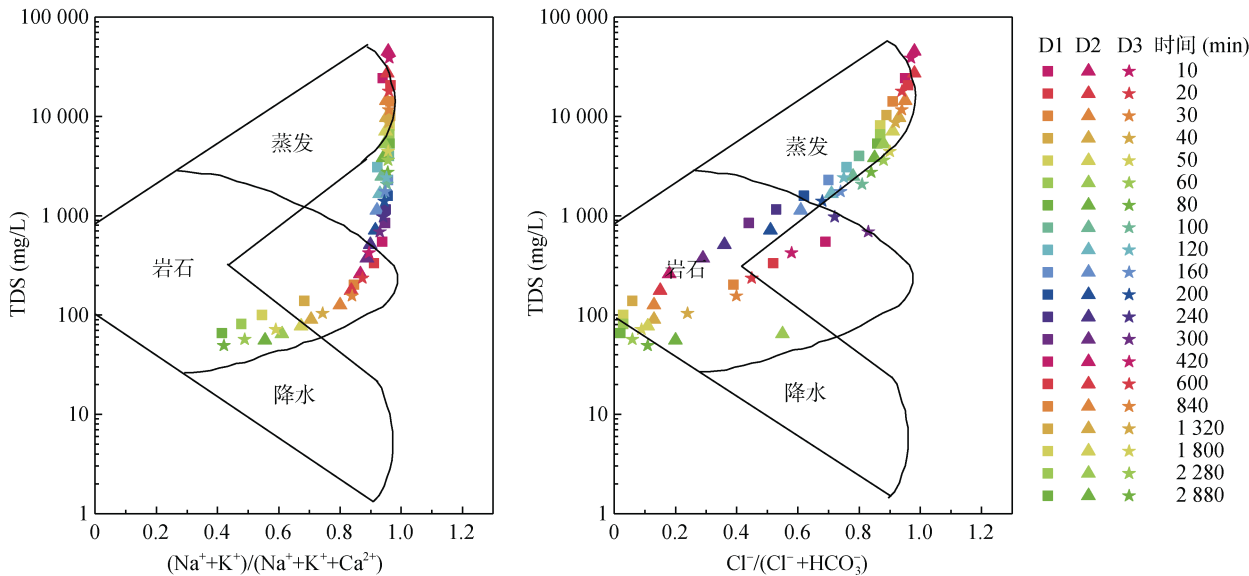


图 8 随降雨历时入渗通过不同珊瑚砂土层水样的化学控制机制
Fig. 8 Controlling mechanism of water samples infiltrated through different coral sand soil layers with rainfall duration

值接近海水特性;之后水岩相互作用增强,具有中等偏高的 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值和中等偏低的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值,且 $\text{TDS} < 1\,000\text{ mg/L}$ 。由此可以确定,热带海岛入渗通过珊瑚砂土层的水化学成分深受蒸发结晶、水岩相互作用和海水混合作用的影响,这主要与海岛所处的海洋环境和干湿季分明的气候密切相关。研究结果可以进一步揭示,当海岛地区正值雨季时,海岛珊瑚砂土层中的各种海洋易溶盐类物质随降雨入渗不断被淋失,水-岩相互作用也越来越明显,这与人工降雨中后期珊瑚砂土层淋溶水中的矿物沉淀占优势结果相一致。

3 结论

1)本研究入渗通过D1、D2和D3水样的TDS最大值分别为24 246.67、44 933.3、38 766.67 mg/L,表明热带海岛表面珊瑚砂土层盐碱化程度普遍较高。但在人工降雨条件下,珊瑚砂土层中的盐分不断淋溶流失,其淋溶水化学类型均可由高矿化度的 $\text{Cl}-\text{Na}$ 水转变为低矿化度的 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 水。

2)相比其他微量元素,入渗通过珊瑚砂土层水样中超标微量元素Al、As、B(D1和D2)、Cr、Fe、Pb的浓度难以下降,需引起重视。

3)控制入渗通过珊瑚砂土层水样水质的水化学机制主要包括蒸发结晶作用和岩石沉淀作用,以及降雨入渗过程中 Na^+ 与 K^+ 、 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 离子交换作用的影响。其中,本研究入渗通过不同珊瑚砂土层的水中都含有过饱和的文石 $[\text{CaCO}_3]$ 、方解石 $[\text{CaCO}_3]$ 、白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 、碳酸钙镁石 $[\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4]$ 、菱镁矿 $[\text{MgCO}_3]$ 和球霏石 $[\text{CaCO}_3, \text{多晶}]$ 等碳酸钙镁矿物,这充分说明热带海岛珊瑚砂土本身富含这些矿物。

参考文献:

- [1] 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: 20.
- [2] 单华刚, 汪稔, 周曾辉. 南沙群岛永暑礁工程地质特性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, (3): 31-36.
- [3] 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.
- [4] White I, Falkland T, Perez P, et al. Challenges in freshwater management in low coral atolls[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(16): 1522-1528.
- [5] André L, Franceschi M, Pouchan P, et al. Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France[J]. Journal of Hydrology, 2005, 305(1/2/3/4): 40-62.
- [6] 孙宗勋, 詹文欢, 朱俊江. 南沙群岛珊瑚礁岩体结构特征及工程地质分带[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(3): 11-20.
- [7] Romshoo S A, Dar R A, Murtaza K O, et al. Hydrochemical characterization and pollution assessment of groundwater in Jammu Siwaliks, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(3): 122.
- [8] van der Velde M, Green S R, Vanclooster M, et al. Sustainable development in small island developing states: Agricultural intensification, economic development, and freshwater resources management on the coral atoll of Tongatapu[J]. Ecological Economics, 2007, 61(2/3): 456-468.
- [9] Jafar Ahamed A, Ananthakrishnan S, Loganathan K, et al. Assessment of groundwater quality for irrigation use in Alathur Block, Perambalur District, Tamilnadu, South India[J]. Applied Water Science, 2013, 3(4): 763-771.
- [10] 赵素丽. 西沙珊瑚岛礁淡水透镜体的生物修复试验研究[J]. 水处理技术, 2007, 33(8): 77-78.
- [11] Allison J D, Brown D S, Novo-Gradac K J. MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: Version 3.0 user's manual[EB/OL]. 1991
- [12] Swarna Latha P, Nageswara Rao K. An integrated approach to assess the quality of groundwater in a coastal aquifer of Andhra Pradesh, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(8): 2143-2169.
- [13] Shirodkar P V, Mesquita A, Pradhan U K, et al. Factors controlling physico-chemical characteristics in the coastal waters off Mangalore—A multivariate approach[J]. Environmental Research, 2009, 109(3): 245-257.
- [14] 王玮韧, 郝琰存, 王俊, 等. 珊瑚岛礁表层土壤的主要化学性质分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(5): 465-472.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所考察组. 南海诸岛的土壤和鸟粪磷矿[J]. 土壤, 1976(3): 124-131.
- [16] 龚子同, 黄标. 南海诸岛土壤的地球化学特征及其生物有效性[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 10-27.
- [17] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL 237—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [18] 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J]. 热带海洋学报, 2000, 19(2): 1-8.
- [19] 中华人民共和国水利部. 土的分类标准: GBJ145-90[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [20] 中华人民共和国建设部. 建筑地基基础设计规范: GB50007—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [21] 中华人民共和国卫生部. GB/T5750.6—2006《生活饮用水标准检验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [22] Gustafsson J P. Visual MINTEQ 3.0 user guide[J]. Department of Land & Water Resource engineering, 2012.
- [23] 柯林斯(A.G.Collins). 林文庄, 王秉忱译. 油田水地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984: 182-184.
- [24] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [25] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237.

- [26] Li Z X, He Y Q, Pang H, et al. Chemistry of snow deposited during the summer monsoon and in the winter season at Baishui glacier No. 1, Yulong mountain, China[J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(190): 221–228.
- [27] Organization W H. Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth edition Incorporating the First Addendum[J]. World Health Organization, 2017.
- [28] 李光宇, 吴次芳. 土壤微生物研究在农田质量评价中的应用[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 20–33.
- [29] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61–66.
- [30] 崔闪闪, 刘庆, 王静. 滨海开发带土壤重金属分布特征及来源分析[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 399–405.
- [31] 龚子同, 张甘霖, 杨飞. 南海诸岛的土壤及其生态系统特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 183–188.
- [32] 郭丽芬. 南沙群岛珊瑚礁的元素地球化学[C]//南沙群岛及其邻近海区地质地球物理及岛礁研究论文集(一). 北京: 海洋出版社, 1991: 206–223.
- [33] Nagaraju A, Sharifi Z, Balaji E. Statistical and analytical evaluation of groundwater quality of Tirupati area, Chittoor district, Andhra Pradesh, South India[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2016, 88(2): 222–234.