

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190198

珊瑚岛礁地下水水化学特征及其形成机制

唐健健^{1,2,3}, 胡明鉴², 汪 稔^{1,2,3}

- (1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071;
2. 广西大学土木建筑工程学院 工程防灾与结构安全教育部重点实验室,广西 南宁 530004;
3. 广西大学海洋学院 广西南海珊瑚礁研究重点实验室,广西 南宁 530004)

摘要:我国热带海洋地区珊瑚岛礁星罗棋布,岛礁地下水对海洋环境和植物生态格局具有重要意义。为了揭示岛礁地下水的演化机制,基于西沙某珊瑚岛礁水文地质勘察和野外水样品采集分析,开展岛礁地下水主要水化学离子现场和室内测试,分析珊瑚岛礁地下水水化学总体分布特征和主要离子组分之间的关系,探讨了研究区地下水演化过程。研究表明岛礁地下水水化学类型为 Cl-Na 型和 Cl-Na·Mg 型,在岛礁地下水潜水面处更易发生活跃的碳酸盐矿物的溶解作用,在海水掺混、蒸发浓缩和含水层矿物溶解及沉淀作用等综合影响下造成岛礁地下水不同离子组分的增加或减少。

关键词:珊瑚岛礁;地下水;水化学;碳酸盐

中图分类号:P461.3

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2020)05-0085-06

珊瑚岛礁地下水系统是动态演化的,也易受各种自然因素和人类活动影响的脆弱系统^[1],含水层的地质特征、水文气象条件和海水入渗掺混等多种因素的影响,使得地下水空间分布和水化学特征较为复杂。

鉴于地下水资源在岛礁建设中的重要性,早在 20 世纪 70 至 90 年代期间就有国内学者开展了珊瑚岛礁的地质勘察^[2-3],查明了岛礁地质的沉积特征和含水层结构,为后续岛礁地下水的研究提供了依据。邱汉学^[4]等通过对不同海岛的 73 个水样品的水化学参数的统计分析表明,海岛地下水盐分的变化是受到混合作用、溶解-沉淀作用及阳离子交替吸附等多因素影响。随着我国岛礁建设进一步推进,围绕岛礁地下水的开发利用开展了淡水透镜体的数值模拟^[5-6]和地下水水质修复实验^[7-8]等方面的研究。Niels Oluf Jorgensen^[9]曾在丹麦南部海岸的一个岛礁上发现具有一定盐度的地下水,通过研究得出砂盘表层土壤中盐的周期性析出和溶解是地下水盐度增加的原因。Mehrdad Hejzian^[10]等学者评估了马绍尔群岛共和国 Roi-Namur 岛的土地利用和含水层补给的变化对岛礁地下水水化学和供应的影响,结果表明植被覆盖的减弱和含水层回灌行动

增加了岛礁可饮用地下水量,海水与淡水的混合作用和碳酸盐溶解-沉淀平衡过程共同影响着岛礁地下水水化学过程。

本文根据在西沙的珊瑚岛礁进行的水文地质勘察和野外采集水样的工作,利用所获取的地下水主要化学分析资料,综合运用统计方法、水化学类型图解法和离子组合及比值法等,分析地下水水化学各组分之间的相互关系,以及含水层中可能发生的物理化学反应,探讨岛礁地下水系统形成机理过程及影响因素,以为珊瑚岛礁地下水的开发利用和管理提供科学依据。

1 研究区概况与样品采集

1.1 研究区概况

研究区是西沙群岛中一个珊瑚岛礁,地处热带季风及海洋湿润气候,年太阳辐射总量在 6 000MJ/m² 以上,年平均气温 26~27℃,降水量大,但季节之间分配不均。年降雨量近 1 500mm,降雨主要集中在夏季风期和夏-冬季风过渡期的 6~11 月,最多雨月份 10 月的月雨量达到 259.3mm,最少雨月份 2 月的月雨量仅

收稿日期:2019-06-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41572304);中科院科技先导专项 A 类子课题(XDA13010301)

作者简介:唐健健(1992-),男,硕士研究生,主要从事地下水方面的研究工作。E-mail:1053623061@qq.com

通讯作者:胡明鉴(1974-),男,博士,研究员,主要从事滑坡泥石流研究和地下水动力学方面的工作。E-mail:mjhu@whrsm.ac.cn

11.9mm;由于蒸发作用大,年平均相对湿度约 81%。

珊瑚岛礁拥有特殊的地质结构,下部为更新世溶蚀灰岩,孔隙发育、渗透性强,海水十分容易侵入和流通。上部全新世沉积灰岩形成年代较晚,其孔隙、岩溶发育不充分,相对而言渗透性较小,海水不容易渗入,雨水也容易保留^[1]。再往上为次生孔隙不发育、未固结的沙砾沉积层,埋深约 20 多米。地表面是约 0.5m 厚鸟粪土,灰褐色弱胶结。区域内无地表河流,地下水系统的补给来源以大气降雨为主。

1.2 样品采集和数据来源

野外三个钻探孔采集点位于西沙某天然珊瑚岛区上,编号为 A、B、C(见图 1)。现场采用 Solinst 双阀取样泵对岛上这 3 个深度 20m 左右的钻孔,以 1m 的取样间隔获得高质量水样品 44 个,样品采集严格按照国家有关标准^[2]进行。取样前用去离子水清洗采样瓶三次,所采水样润洗三次,所有地下水样均用 0.45 μm 微孔滤膜过滤,用于阳离子测试的样品,添加 0.1mL 优级纯 HNO_3 使其 $\text{pH}<2$;用于阴离子测试的样品,过滤后直接保存用于测试分析。海水测试 2 个平行试样,取其分析结果平均值(编号 H);同时,出于对比需要,分别采集降雨(编号 Y)和岛礁水井应急直饮水样品(编号 D)进行对比测试分析。

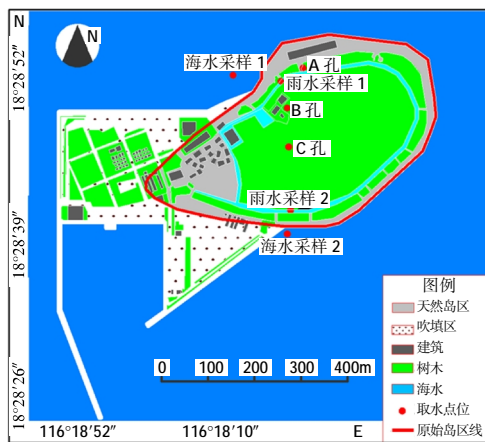


图 1 孔位采样点分布

Fig.1 The distribution of hole sampling points

现场用 Manta 多参数水质监测仪进行测量,其测定的指标有 pH 、水温(T)、电导率、总溶解固体(TDS)、溶解氧(DO)和硝酸根(NO_3^-)、铵根离子(NH_4^+)等。同时对平行试样,使用中国地质大学(武汉)材料科学与化学工程学院实验室的电感耦合等离子体光谱仪(PerkinElmerOptima5300DV)进行钾(K^+)、钠(Na^+)、镁

(Mg^{2+})、钙(Ca^{2+})阳离子测定,执行 US EPA(美国环保总署) 200.7 方法^[3],检测限为 0.02mg/L;氯离子(Cl^-)采用硫氰酸汞法、硫酸根(SO_4^{2-})采用硫酸钡沉淀法、碱度则采用滴定法,三者精确读数在 DR6000 紫外可见分光光度计主机进行测定,光度测量准确度在 0.0~0.5Abs 时为 5mAbs,在 0.5~2.0Abs 时为 1%。

为了解含水层介质的岩性特征,选取钻探孔 C 的 4 个砂土样进行烘干、研磨、过筛后,使用中国科学院武汉岩土力学研究所实验测试中心 D8 Advance X-射线衍射仪进行砂土样矿物成分分析。取砂土情况见表 1。

表 1 研究区砂土取样情况

Table1 The sand sampling situation in the study area

编号	取样深度	描述
1	0-0.2m	磷质鸟粪土,粒块状土,暗棕色
2	0.2-0.5m	磷质石灰土,弱固结,内含白色细砂
3	9m	全新世风积中细砂,灰白色
4	19m	全新世风积粉细砂,白色

注:地下水面距地表面约 2.3m。

2 结果

2.1 水化学总体特征

研究区 44 个地下水样水化学总体统计特征见表 2,结果表明地下水总体呈中性偏弱碱性,阳离子以 Na^+ 为主,其平均值由大到小排列为 $\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}>\text{K}^+>\text{NH}_4^+$;阴离子以 Cl^- 为主,均值排列为 $\text{Cl}^->\text{SO}_4^{2-}>\text{HCO}_3^->\text{NO}_3^-$ 与海水相比,研究区地下水主要离子均值大小关系与海水相同,反映出明显的海水掺混成因。TDS 低于海水, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 平均值却大于海水,这两个离子是碳酸盐发生溶解作用的典型产物。其余离子均值低于海水, pH 值变异系数较小,除 pH 、 NO_3^- 和 TDS 外,其余组分浓度的变异系数都大于 10%,属于随着周围环境因素变化的敏感因子。

本文将采集水样的测试结果通过 Origin 软件绘制 piper 三线图(见图 2),地下水样的 pH 值在 7.30~7.72 之间偏弱碱性,雨水 pH 值 6.78 偏弱酸性,海水 pH 值 8.23 偏弱碱性。

按照舒卡列夫顺序命名分类法^[4]研究区内地下水主要类型是 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型水,少部分为 $\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型水。雨水主要类型是 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}$ 型水,D 岛井水主要类型是 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型水,研究区 44 个地下水样点在

表2 研究区地下水水化学总体描述性统计分析

Table2 The general descriptive statistical analysis of the groundwater chemistry

	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	海水
pH	7.30	7.72	7.43	0.09	1.20	8.23
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	577.09	1 274.88	1 060.50	130.97	12.35	1 152.85
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	244.68	432.32	374.57	39.12	10.45	368.30
Na ⁺ /mg·L ⁻¹	4481.46	9 828.13	8 219.30	988.04	12.02	8 793.01
K ⁺ /mg·L ⁻¹	193.31	386.18	327.00	36.10	11.04	349.39
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	5 603.00	14 242.00	11 760.86	1 628.57	13.85	16 598.00
SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	660.00	2 339.00	1 942.18	284.42	14.64	2 365.00
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	165.92	346.48	262.13	51.08	19.49	131.76
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	21.15	28.81	26.53	1.15	4.32	41.11
NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	76.10	163.95	150.95	16.06	10.64	146.79
TDS/mg·L ⁻¹	16 848.61	32 789.78	30 242.17	2 863.21	9.47	35 270.00

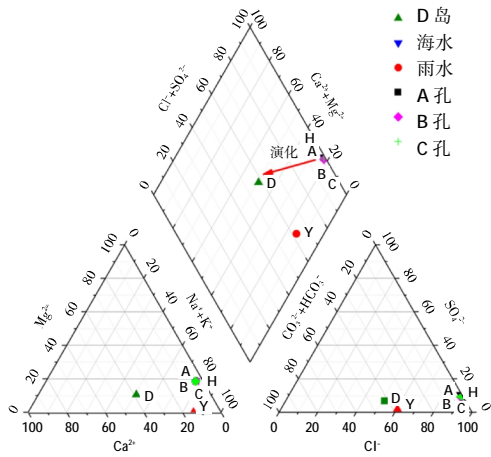


图2 地下水 piper 三线图

Fig.2 The piper three-line diagram of groundwater

piper 三线图上分布比较集中,且几乎与海水样品点在图上位置重叠在一起,说明目前地下水与当地海水的化学成分组成比例较为一致,化学性质以碱金属和强酸为主^[5],电导率在 26 000~52 000uS/cm 之间,盐度范围 16~33.5,TDS 范围 17~33g/L,且电导率、盐度和 TDS 随着深度的增加而不断增大。

2.2 含水层矿物组成

由 XRD 的测试结果表 3 可以看出,研究区含水层的主要矿物成分为碳酸盐类矿物,其质量分数占总体 97%以上,在这些碳酸盐矿物中,有文石、方解石和镁质方解石。

3 讨论与分析

3.1 主要组分沿深度方向的变化规律

3.1.1 阳离子

Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺四种阳离子含量大体上随着深

表3 钻孔C砂土样矿物学分析数据

Table3 The sand soil mineralogy analysis data of drill hole C

编号	取样深度	文石/%	方解石/%	镁质方解石/%	岩盐/%
1	0~0.2m	76.85%	9.63%	11.06%	2.45%
2	0.2~0.5m	75.44%	8.62%	15.42%	0.52%
3	9m	75.34%	--	24.66%	--
4	19m	37.43%	62.57%	--	--

度的增加而不断增大,最终趋于稳定,随着深度的增加,海水的溶质组分在混合水中所占的比例也越高,离子浓度与深度为非线性关系^[6](见图 3)。这是因为底部含盐量高的地下水与雨水存在着一定的浓度差,盐分在地下水中进行迁移,发生了以机械混合作用为基础的化学过程。

3.1.2 阴离子和 pH 值

Cl⁻和 SO₄²⁻含量随深度的增加而增加,变化规律与上述阳离子相同,但是 HCO₃⁻含量随着深度的增加而减小,然后趋于稳定(见图 4)。这是由于在包气带中,植物根部区域的微生物氧化起着重要的作用,该区域 CO₂ 的浓度大于地面空气,对于碳酸盐矿物最为活跃的溶解作用发生在包气带中孔隙水区和靠近地下水位的地方^[10]。故地下水面处 HCO₃⁻含量最高,pH 值最大,碱性最强,且 pH 值的变化规律与 HCO₃⁻大致相同。

3.2 各离子组分之间的关系

3.2.1 Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻和 Cl⁻关系

研究区地下水 Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻分别随着 Cl⁻含量的增加而变大,呈一定的正比例关系,同时将当地雨水和海水数据点标记在图中并用直线连接,将该直线命名为海水和雨水混合理论比值线^[17](见图 5)。SO₄²⁻-Cl⁻关系图围绕海水和雨水混合理论比值线周围分布,相

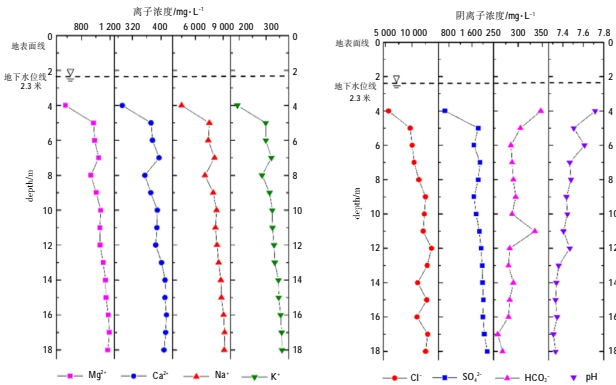


图3 阳离子沿深度变化

Fig.3 The cation vary with the depth

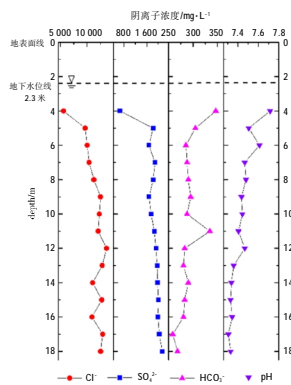
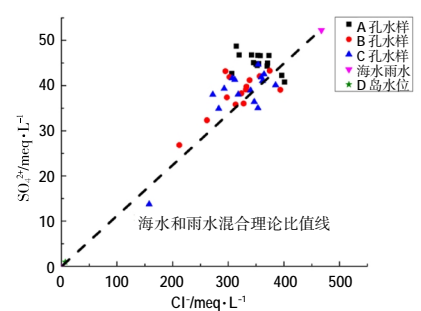
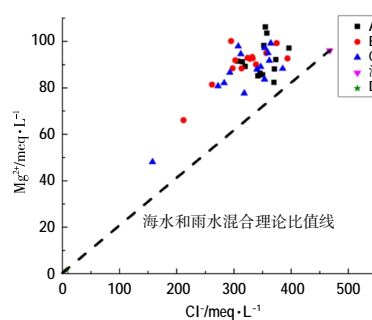
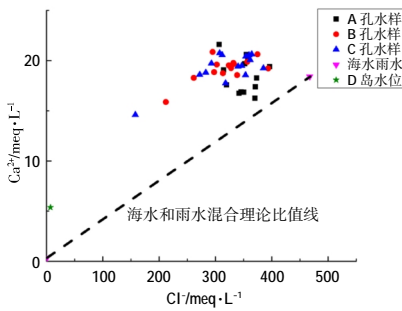


图4 阴离子和pH值沿深度变化

Fig.4 The anion and pH vary with the depth

图5 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- (当量浓度) 比值Fig.5 The ratio of Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} and Cl^- (equivalent concentration)

比 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 而言, SO_4^{2-} 与 Cl^- 的相关性更好。

Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 在海水中占主要成分, 若研究区内地下水只是当地雨水与海水简单的混合, 混合水中 Cl^- 浓度增加的同时, 其他成分也会呈现同比例的增长, 则 A、B、C 组水样都应该沿着海水和雨水混合理论比值线分布。目前三组水样的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 与 Cl^- 当量浓度比值绝大部分都位于比值线的上方, 二者的偏差说明了研究区地下水并不只是当地雨水与海水简单的混合, 而是在这混合的过程中, 文石、方解石、镁质方解石等碳酸盐矿物发生了溶解作用, 才使得 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的含量发生了改变^[18]。

3.2.2 Na^+ 和 Cl^- 关系

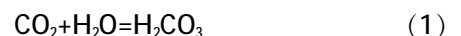
钠氯系数 (rNa/rCl) 即单位体积水中钠离子与氯离子的当量浓度比值, 通常情况下, 标准海水中 $rNa/rCl=0.85$ ^[19-20], 研究区海水样品测试得到的 rNa/rCl 比值为 0.82, 从图 6、7 中看出, 绝大部分的水样钠氯系数位于 1.0~1.2。水样 Na^+ 与 Cl^- 当量浓度比值点都分布在理论比值线上方。可知研究区地下水系统发生了含钠盐矿

物的溶解作用和一定的蒸发浓缩作用使得 rNa/rCl 比值点偏离当地海水和雨水混合理论比值线^[21]。值得指出水样 A3、A14 的 rNa/rCl 小于当地海水, 特别是水样 A14 小于 0.65, 说明此处发生了 Na^+ 离子交换过程, 导致水中 Na^+ 含量的减少^[22]。

3.2.3 HCO_3^- 和 Cl^- 关系

从图 8 中可以看出相对于 Cl^- 浓度的变化来说, 各组的 HCO_3^- 含量都保持相对稳定, 即 HCO_3^- 含量和 Cl^- 含量没有明显的相关性。结合研究区水文地质情况可知, 由大气降水在地面入渗经过包气带的过程中, 包气带中的 CO_2 溶于水形成碳酸, 碳酸离解出 H^+ 和 HCO_3^- , H^+ 参与矿物的溶解反应, HCO_3^- 则进入地下

水中^[18]。发生的化学反应式如下:



B、C 组样品的 HCO_3^- 含量约为 A 组样品的 1.5~2 倍, A 孔周围的地表面是裸露的松散珊瑚砂, B 和 C 孔周围不仅树木草地等植物茂盛, 并且地表面是约 50cm 鸟粪土, 在这样土壤孔隙空间中, 植物根系附近的微生物进行呼吸作用产生 CO_2 浓度可以高出海平面大气中 CO_2 的浓度几倍, 雨水通过土壤获得更多的溶解势^[23], 这些 CO_2 主要是由土壤中的根系和有机物的分解产生的^[1]; 即 B 和 C 孔上部土壤植物根系周围微生物的呼吸作用相对于 A 更为强烈, 致使包气带的 CO_2 含量和浓度更高, 故 B、C 组样品的 HCO_3^- 含量也更高。

3.2.4 各组分相关性分析

相关分析分析可用来揭示地下水水化学组分之间的相似相异性及来源的一致性和差异性^[22]。研究区地下水总溶解固体 (TDS) 与阳离子相关系数大小依次

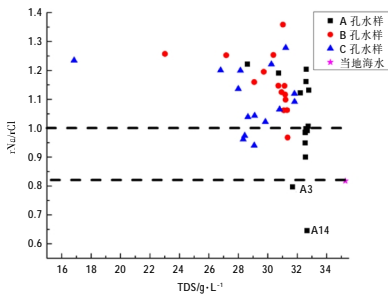


图6 钠氯系数与TDS关系

Fig.6 The relationship between sodium chloride coefficient and TDS

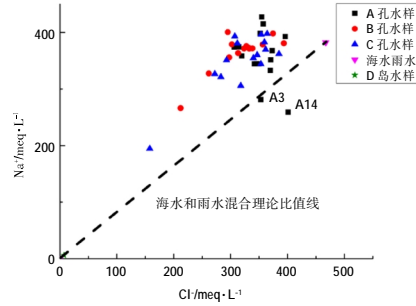


图7 Na⁺与Cl⁻当量浓度比值

Fig.7 The ratio of Na⁺ and Cl⁻ equivalent concentration

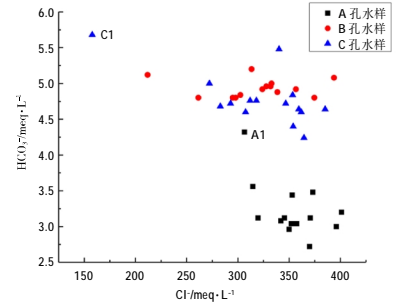


图8 HCO₃⁻/Cl⁻(当量浓度)比值

Fig.8 The ratio of HCO₃⁻/Cl⁻(equivalent concentration)

排列为 $NH_4^+ > Na^+$ 和 $K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$; TDS 与阴离子相关系数依次为: $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > HCO_3^-$ (见表4)。其中 HCO_3^- 与阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的相关程度不显著,是因为 HCO_3^- 主要来源和这些离子不同。而 TDS 与 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 离子具有较大相关系数和显著水平,表明三者具有同源性,都来自海水的输入,其离子浓度随着海水与雨水混合程度呈正比例变化。其次 TDS 与 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 离子具有较强的相关性,说明除了海水,地下水还存在着其他盐源输入,特别的除了与 Na^+ 和 K^+ 、 Ca^{2+} 与其余离子相关性都不显著,反映出碳酸盐岩对于地下水水的输入。

4 结论

该岛礁地下水水化学类型为 CI-Na 型和 CI-Na-Mg 型水, TDS 低于海水, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 平均值却大于海水,其余离子均值低于海水。 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子组分含量总体上随着深度的增加而不断增大,最终趋于稳定,而 HCO_3^- 变化规律与之相反,表明地下水形成

并不只是当地雨水与海水简单的混合,而是在机械混合作用基础上,历经一定的化学过程形成。

珊瑚岛礁地表面约 50cm 鸟粪土中存在着大量的微生物,植物根系周围的微生物对有机物的分解产生 CO_2 , 当雨水通过土壤获得了更多的溶解势,受此影响,碳酸盐矿物的溶解度可大大增加,且该碳酸盐矿物的溶解过程在岛礁地下水潜水面处最为活跃。由此说明,岛礁植被状态与碳酸盐的溶解过程密切相关。

岛礁地下水水化学特征总体上与周边海水较为一致,其中海水和雨水的掺混对水化学成分起控制作用,岛礁地下水演化经历着多种物理化学作用,各种离子组分变化的差异性海水掺混、蒸发浓缩和含水层钙质矿物溶解及沉淀等综合作用造成的。

参考文献:

- [1] Eleonora Carol, Leandro Garcia, Guido Borzi. Hydrogeochemistry and sustainability of freshwater lenses in the Samborombon Bay wetland, Argentina [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2015, 60: 21-30.
- [2] 卢演铸,杨学昌,贾蓉芬.我国西沙群岛第四纪生物沉积物及成岛时

表4 地下水各组分间的相关系数

Table4 The correlation coefficients between the components of groundwater

组分	pH	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	TDS
pH	1										
Mg ²⁺	-0.579**	1									
Ca ²⁺	-0.312*	0.856**	1								
Na ⁺	-0.605**	0.994**	0.840**	1							
K ⁺	-0.583**	0.994**	0.838**	0.997**	1						
Cl ⁻	-0.695**	0.486**	0.129	0.518**	0.509**	1					
SO ₄ ²⁻	-0.771**	0.612**	0.229	0.632**	0.627**	0.719**	1				
HCO ₃ ⁻	0.409**	-0.134	0.287	-0.140	-0.160	-0.489**	-0.665**	1			
NO ₃ ⁻	-0.372*	0.511**	0.181	0.520**	0.518**	0.510**	0.531**	-0.171	1		
NH ₄ ⁺	-0.621**	0.638**	0.206	0.655**	0.659**	0.728**	0.791**	-0.484**	0.857**	1	
TDS	-0.757**	0.642**	0.199	0.662**	0.661**	0.833**	0.907**	-0.629**	0.701**	0.944**	1

注:**为相关性在0.01层上显著(双尾),*为相关性在0.05层上显著(双尾)。

- 期的探讨[J]. 地球化学, 1979,(2): 93-102+179-180. (LU Yanchou, YANG Xuechang, JIA Rongfen. Quarternary biological sediments in the Xisha Archipelago, China and a discussion on the age of island-formation [J]. Geochimica, 1979,(2): 93-102+179-180. (in Chinese))
- [3] 吕炳全, 王国忠, 全松青. 西沙群岛灰砂岛的沉积特征和发育规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, (2):59-69. (LV Bingquan, WANG Guozhong, QUAN Songqing. Sedimentary characteristics and evolutionary pattern of the sand cays in the Xisha Islands [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, (2): 59-69. (in Chinese))
- [4] 邱汉学, 刘贯群. 海岛及滨海地带地下水的地球化学特征[J]. 工程勘察, 1996, (5):24-27. (QIU Hanxue, LIU Guanqun. Hydrogeochemical characteristics of groundwater in islands and coastal areas [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1996,(5):24-27. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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 lens in coral islands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 560-566. (in Chinese))
- [7] 周从直, 赵素丽, 谯华. 珊瑚岛礁淡水透镜体的生物修复研究[J]. 海洋科学, 2008,(4): 68-73. (ZHOU Congzhi, ZHAO Suli, QIAO Hua. Bioremediation research of freshwater lens in a coral island [J]. Marine Sciences, 2008,(4): 68-73. (in Chinese))
- [8] 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,(8): 77-78. (ZHAO Suli. The bioremediation of freshwater lenses of Xisha Coral Islands [J]. Technology of Water Treatment, 2007,(8): 77-78. (in Chinese))
- [9] Niels Oluf Jorgensen. Origin of shallow saline groundwater on the Island of Læsø, Denmark [J]. Chemical Geology, 2002, 184:359-370.
- [10] Mehrdad Hejazian, Jason J. Gurdak, Peter Swarzenski, et al. Land-use change and managed aquifer recharge effects on the hydrogeochemistry of two contrasting atoll island aquifers, Roi-Namur Island, Republic of the Marshall Islands [J]. Applied Geochemistry, 2017, 80: 58-71.
- [11] 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))
- [12] DZ/T 0064.2-1993, 地下水水质检验方法-水样的采集和保存[S]. (DZ/T 0064.2-1993, Groundwater Quality Inspection Method - Collection and Preservation of Water Samples [S]. (in Chinese))
- [13] John Cauduro, Andrew Ryan. 使用 Agilent 5100 同步垂直双向观测 ICP-OES 按照 US EPA 200.7 方法对水中痕量元素进行超快速测定[J]. 环境化学, 2015, 34(3): 593-595. (John Cauduro, Andrew Ryan. Ultra-fast determination of trace elements in water using the Agilent 5100 synchronous vertical two-way observation ICP-OES according to US EPA 200.7 [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(3): 593-595. (in Chinese))
- [14] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 2012. (QIAN Hui, MA Zhiyuan, LI Peiyue. Hydrogeochemistry (Second Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese))
- [15] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘察, 1983,(6):6-11. (WANG Ruijiu. Three-line diagram and its hydrogeological interpretation [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1983, (6): 6-11. (in Chinese))
- [16] 任加国, 武倩倩, 郑西来. 咸淡水过渡带化学过程的试验研究[J]. 地质通报, 2008,(6):882-887. (REN Jiaguo, WU Qianqian, ZHENG Xilai. Experimental study of chemical processes in a saline water-freshwater transition zone [J]. Geological Bulletin of China, 2008,(6): 882-887. (in Chinese))
- [17] Eleonora Carol, Eduardo Kruse, Josep Mas-Pla. Hydrochemical and isotopic evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina [J]. Journal of Hydrology, 2009, 365: 335-345.
- [18] 杨巧凤, 王瑞久, 徐素宁, 等. 莱州湾沿岸寿光、莱州和龙口地下水的稳定同位素与地球化学[J]. 地质学报, 2016, 90(4):801-817. (YANG Qiaofeng, WANG Ruijiu, XU Suning, et al. Hydrogeochemistry and stable isotopes of groundwater from Shouguang, Laizhou and Longkou in the south coast aquifer of Laizhou Bay [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4): 801-817. (in Chinese))
- [19] 李建森, 李廷伟, 马海州, 等. 柴达木盆地西部新近系和古近系油田卤水水化学特征及其地质意义[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 28-36. (LI Jiansen, LI Tingwei, MA Haizhou, et al. Investigation of the chemical characteristics and its geological significance of the Tertiary oilfield brine in the western Qaidam basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 28-36. (in Chinese))
- [20] 肖懿, 杜尧, 陈柳竹, 等. 南海北部沉积盆地油田水水化学特征及其成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 16-23. (XIAO Cong, DU Yao, CHEN Liuzhu, et al. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the oilfield water in the north part of the sedimentary basins in the South China Sea [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 16-23. (in Chinese))
- [21] 邢立亭, 张凤娟, 李常锁, 等. 鲁北平原浅层地下水水化学特征[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 90-94. (XING Liting, ZHANG Fengjuan, LI Changsuo, et al. Hydro-chemical characteristics of shallow groundwater in the north Shandong plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 90-94. (in Chinese))
- [22] 支兵发, 姚普, 姜守俊, 等. 珠江三角洲地下咸水形成的水化学证据[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 133-139. (ZHI Bingfa, YAO Pu, JIANG Shoujun, et al. Hydrochemical evidences of saline groundwater genesis in the Pearl River delta area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 133-139. (in Chinese))
- [23] Michael J Lace, John E Mylroie. Coastal Karst Landforms [M]. USA: Coastal Research Library, 2013.