

海南岛东北部东寨港滨海地下水排泄及其对红树林生境的影响

柯贤忠, 张旭, 张彦鹏, 黎清华, 谢先军, 陈文峰

Submarine groundwater discharge and its impact on mangrove habitats in Dongzhaigang Area, Northeastern Hainan Island

KE Xianzhong, ZHANG Xu, ZHANG Yanpeng, LI Qinghua, XIE Xianjun, and CHEN Wenfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202409062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律

Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jianghan Plain

蔡玲, 胡成, 陈植华, 王清, 王宁涛, 常威, 黄琨 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 18-25

云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式

Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yunying Basin

常威, 黄琨, 胡成, 王清, 王宁涛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 9-15

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland

郜会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182-191

西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制

Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China

胡顺, 凌抗, 王俊友, 乔树锋, 葛孟琰, 孙自永, 马瑞 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 22-31

白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake

李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 48-54

旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位-水量”双控技术

Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas

刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 刘少玉, 聂振龙 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 42-51



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202409062

柯贤忠, 张旭, 张彦鹏, 等. 海南岛东北部东寨港滨海地下水排泄及其对红树林生境的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 43-55.

KE Xianzhong, ZHANG Xu, ZHANG Yanpeng, et al. Submarine groundwater discharge and its impact on mangrove habitats in Dongzhaigang Area, Northeastern Hainan Island[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 43-55.

海南岛东北部东寨港滨海地下水排泄及其对红树林生境的影响

柯贤忠¹, 张旭^{2,3}, 张彦鹏¹, 黎清华¹, 谢先军⁴, 陈文峰^{2,3}

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;
2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点
实验室, 湖北 武汉 430040; 4. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 海底地下水排泄(submarine groundwater discharge, SGD)是经常被忽视的重要海陆物质交换途径, 驱动着陆源淡水与生源要素输入海洋, 影响滨海湿地生态系统健康。合适的盐度和良好的环境质量是适宜的红树林湿地生境特征, 从地下水视角开展 SGD 对东寨港红树林生境的影响研究较少, 红树林生态保护修复是否需要关注地下水的作用仍需探索。为揭示海南东寨港 SGD 的特征及其对红树林生境的影响, 以红树林湿地水体中氡(²²²Rn)活度为研究对象, 分析海水²²²Rn 活度的时空变化及其影响因素, 并基于²²²Rn 质量平衡模型, 估算了东寨港地区 SGD 和其携带营养盐的通量。结果表明, ²²²Rn 活度变化主要受丰枯水期循环、潮汐水位波动、断裂带构造、表层沉积物性质等因素影响。基于该区域²²²Rn 质量平衡模型, 估算得到丰水期、枯水期 SGD 通量分别为 8.90×10^5 , 6.84×10^5 m³/d; 结合地下水端元的溶质浓度, 估算了 SGD 驱动的营养盐通量。其中, 丰水期磷酸盐、亚硝酸盐及硝酸盐的通量分别为 6 440, 53.44, 1 084 kg/d; 枯水期营养盐通量约为丰水期的 2/3。东寨港红树林湿地 SGD 通量与当地河流排泄量为同一数量级, 其携带的营养盐通量也非常可观; SGD 通量热区和冷区分别对应红树林稀疏区与繁茂区, 表明 SGD 可能通过降低红树林湿地盐度或环境质量对东寨港红树林湿地生境产生负面影响。该成果可为东寨港红树林湿地生态保护修复提供理论支撑。

关键词: 海底地下水排泄; 氡同位素; 营养盐; 红树林湿地; 海岸带

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0043-13

Submarine groundwater discharge and its impact on mangrove habitats in Dongzhaigang Area, Northeastern Hainan Island

KE Xianzhong¹, ZHANG Xu^{2,3}, ZHANG Yanpeng¹, LI Qinghua¹, XIE Xianjun⁴, CHEN Wenfeng^{2,3}

(1. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan, Hubei 430205, China; 2. CCCC Second Navigation Engineering Bureau Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 3. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

收稿日期: 2024-09-18; 修订日期: 2024-12-15

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金项目(U2244225); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190304; DD20230076); 湖北省自然科学基金项目(2025AFD444)

第一作者: 柯贤忠(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事环境地质与水文地质调查研究。E-mail: xzhke208@163.com

通讯作者: 黎清华(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事环境地质和水文地质研究。E-mail: liqinghua@mail.cgs.gov.cn

Abstract: Submarine groundwater discharge (SGD) is a significant yet often overlooked pathway for material exchange between terrestrial and marine environments, delivering freshwater and nutrients to coastal ecosystems and influencing mangrove wetland health. Salinity balance and environmental quality are key factors in maintaining healthy mangrove habitats, yet the role of SGD in shaping these conditions in Dongzhaigang Area, northeastern Hainan, remains poorly understood. Moreover, the importance of groundwater considerations in mangrove ecological protection and restoration requires further exploration. This study investigated SGD characteristics and its ecological impacts on mangrove wetlands in Dongzhaigang Area using radon isotope (^{222}Rn) as a natural tracer. The spatial and temporal variations of seawater ^{222}Rn activity and its influencing factors were analyzed. Based on the ^{222}Rn mass-balance model, the fluxes of SGD and the associated nutrients in Dongzhaigang Area were estimated. The findings indicate that the variation in ^{222}Rn activity is predominantly influenced by the seasonal rainfall, tidal water level fluctuation, fracture zone structure, and the nature of surface sediments. Using the ^{222}Rn mass balance model for the region, SGD fluxes were estimated to be $8.90 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ and $6.84 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ in the wet season and dry season, respectively; SGD-driven nutrient fluxes were estimated by combining the solute concentrations in groundwater. The fluxes of phosphate, nitrite, and nitrate were estimated to be 6 440 kg/d, 53.44 kg/d, and 1 084 kg/d, respectively, in the wet season—approximately two-thirds of these values in the dry season. The estimated SGD fluxes of the mangrove wetland in Dongzhaigang Area are comparable to the local river discharge, and the associated nutrient fluxes carried by the wetland were very significant; the hot and cold zones of SGD fluxes corresponded to the sparse and lush zones of the mangrove forests, respectively, suggesting that SGD may negatively affect mangrove wetland habitats in Dongzhaigang Area by reducing mangrove wetland salinity or environmental quality. This study provides a theoretical basis for the ecological protection and restoration of mangrove wetlands in Dongzhaigang Area.

Keywords: submarine groundwater discharge; radon isotope; nutrients; mangrove wetland; coast

海岸带是海陆相互作用的关键活跃地带,承担着海陆物质输送,能量传输和信息传递等作用^[1-2]。红树林是海岸带重要的生态系统^[3],具有防风固沙、净化调节地表地下水等生态功能。20 世纪 50 年代以来,我国红树林湿地受到多种因素的破坏,面积锐减,之后政府开始重视红树林湿地的保护和恢复工作,建立了多个红树林湿地保护区,海南东寨港是其中之一^[4-5]。虽然保护区中的红树林免于人为砍伐等活动的破坏,但海岸带环境恶化仍影响红树林湿地的恢复与健康发展^[6]。

海底地下水排泄(submarine groundwater discharge, SGD)是指海水以盐水楔的形式侵入到近岸地下含水层中,地下水和海水于地下河口中发生混合作用后在水头差、溶质浓度梯度、潮汐、波浪等驱动力作用下排泄进入海洋的过程^[7-8]。SGD 来自陆源地下水部分被称为陆源地下淡水排泄(submarine fresh groundwater discharge, SFGD),来自海水部分被称为再循环海水排泄(recirculated saline groundwater discharge, RSGD)。RSGD 不带来额外的水量,但是能将含水层中的物质

通过混合稀释作用和溶解作用携带至海洋^[9]。研究表明,海底地下水排泄的淡水及其携带的营养盐在海岸带可产生重要的生态环境效应。吐露港地区的海底地下水排泄研究厘清了吐露港赤潮灾害与 SGD 输送的营养盐的相关性,揭示 SGD 对当地海岸带生态环境产生了重要影响^[10]。即使地表径流携带大量淡水及陆源物质进入海洋,与之相比,SGD 带来的物质通量仍不可忽略^[11]。在海南岛东部文昌市清澜湾河口地区,与当地河流的营养物质通量相比,海底地下水排泄输送的营养物质通量在控制当地营养物质收支方面发挥着不可忽视的作用^[12]。

目前,针对东寨港红树林湿地人为影响因素的研究较多,结果显示造成红树林湿地面积萎缩的主要原因是人类生产生活活动,如城市建设、农业活动、工业生产、城乡生活污水排放等。针对自然因素在红树林湿地退化萎缩过程中的作用研究则相对薄弱,如从湿地定义的水文、土壤和植被 3 个指标看,关于红树林湿地植被和土壤的研究已经较丰富,但对于水文过程(如地下水排泄、潮汐)如何影响红树林湿地生态系

统方面的研究尚较缺乏。

当前,调查地下水排泄的方法主要包括模型模拟法、渗流仪直接测定和同位素示踪法。模型模拟法依赖于建立一个准确可靠的模型,这项工作十分困难^[13-14],难度非常大。使用渗流仪测量可以获得一个位置准确可靠的地下水排泄量,但是要获得一个区域的海底地下水排泄结果,需要投入巨大的工作量^[15],难度也很大。同位素示踪法是目前最理想的 SGD 研究手段,该方法通过估算一定区域的 SGD 通量,解决了点状、高度空间异质性 SGD 通量难以表征区域地下水排泄特征的难题。地下水排泄研究中常用的示踪剂包括 Rn、Ra、CH₄、He、Cl 等^[16],Rn、Ra 同位素是海岸带 SGD 研究中应用最广泛的示踪剂^[17]。氡同位素(²²²Rn, $\lambda=3.82$ d)因其惰性气体、半衰期匹配及来源单一稳定等特点,适合用于示踪短时间尺度地下水与地表水的相互作用^[18-19]。

综上所述,本研究通过分析东寨港地区红树林湿地水体中²²²Rn 活度的时空变异性,探讨该地区 SGD 的影响因素,建立东寨港地区²²²Rn 质量平衡模型并估算 SGD 及其携带的营养盐通量。结合东寨港红树林湿地发育现状与海底地下水排泄冷热区耦合分析,阐述 SGD 对红树林湿地生境可能的影响。这一研究成果不仅可以丰富滨海地下水学科理论,也可为红树林湿地生态保护修复和规划提供理论依据。

1 研究区概况

东寨港地处海南岛东北部,位于海口市美兰区演丰镇,距离海口市 32 km。其外形整体呈漏斗状,类似于楔入陆地的半封闭港湾式潟湖,其北部通过“漏斗口”连接着琼州海峡。该区属于热带季风气候,年均气温为 24.4 °C,其中 1 月平均气温 17.1 °C,7 月平均气温 28.4 °C,海水表层年均气温 24.5 °C。研究区干湿分明,丰水期一般为 5—10 月,枯水期为 11 月至次年 4 月,丰水期降水量可达年降水量的 80%,月降雨日可达 12~22 d,枯水期月降雨日少于 10 d。东寨港港湾内海流平缓,潮汐类型为不规则半日潮。西岸北部为演丰西河、中部为演丰东河、南部为三江河,东岸南部为演洲河、北部为珠溪河,河水均注入港湾内(图 1)。

东寨港内生长着全国成片面积最大、种类齐全、保存最完整的红树林,共有红树植物 16 科 32 种,其中水椰、红榄李、海南海桑、卵叶海桑、拟海桑、木果楝、正红树、尖叶卤蕨为珍贵树种,海南海桑和尖叶

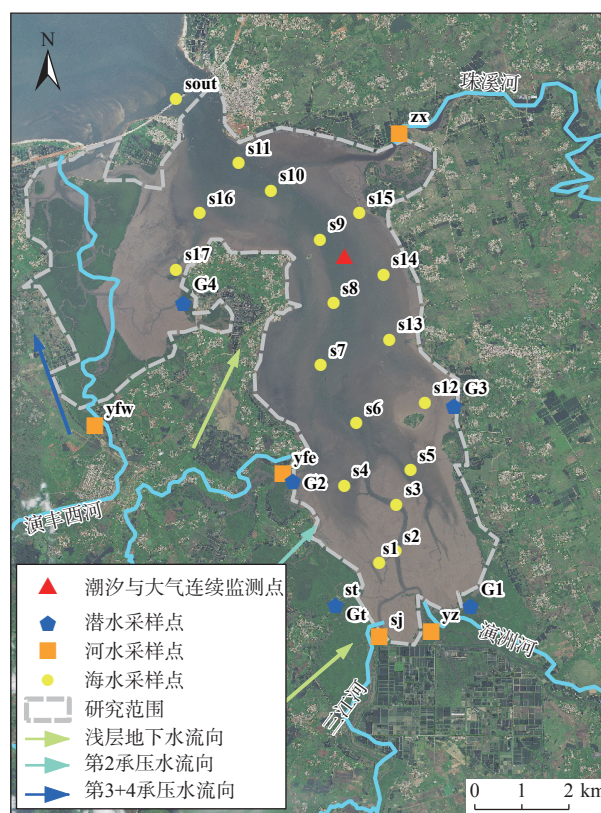
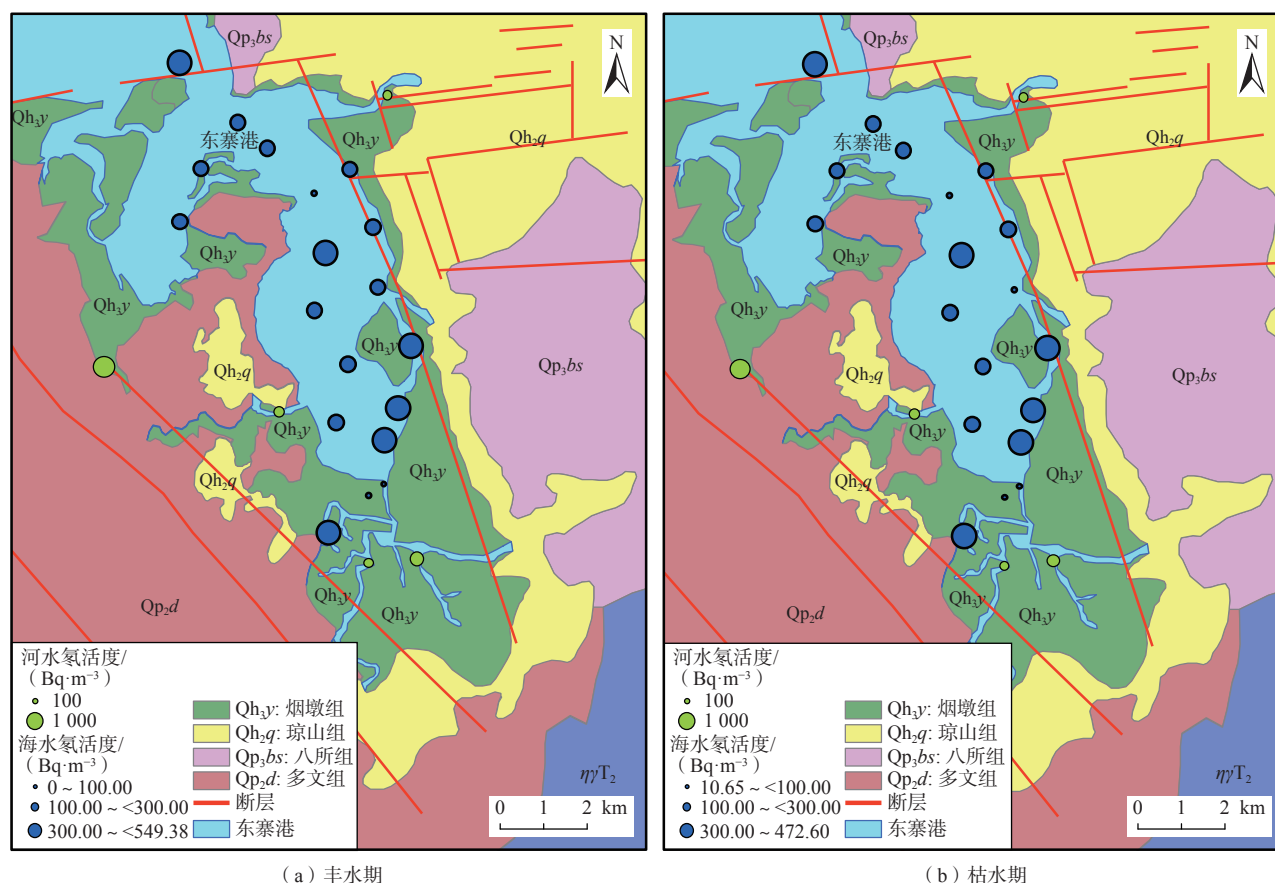


图 1 研究区地理位置和采样点图

Fig. 1 Location of the study area and the sampling sites

卤蕨为海南特有。此外,区内拥有丰富的物种资源,区内已记录的鸟类 208 种,软体动物 115 种,鱼类 160 种,虾类 40 多种,蟹类 60 多种。

东寨港大地构造处于“雷琼拗陷”南缘,是华南大陆边缘新生代构造运动强烈的地区。区内主要出露全新统烟墩组(Qh_{3y})、琼山组(Qh_{2q})、上更新统八所组(Qp_{3bs})和中更新统多文组(Qp_{2d})等地层单元(图 2)。烟墩组和琼山组为海相沉积,前者岩性为粉细砂、含砾中粗砂、淤泥质砂、粉质黏土等,后者岩性主要为黏土和粉砂质黏土,富含贝壳和螺等海相化石,顶部为泥炭层,含有植物残体。八所组岩性为灰白和灰黄色中细砂,为河流相沉积。多文组岩性以辉石橄榄玄武岩、橄榄辉石玄武岩为主。区内发育大量东西向、北北西向、北西向活动构造(图 2)。地下水类型主要包括第四系松散岩类孔隙潜水、火山岩类孔洞裂隙水和松散-半固结岩类孔隙承压水。第四系松散岩类孔隙潜水主要分布于铺前大桥—铺前镇—梅坡大村—三江镇冲洪积平原和滨海堆积平原地区,含水层厚度一般为 5~10 m,最厚可达 31 m,水位埋深为 0~11.9 m。火山岩类孔洞裂隙水主要分布于塔市—演丰—三江一带,局部地段地下水直接与下部微承压水联通。松

图2 丰水期与枯水期东寨港海水²²²Rn活度空间分布Fig. 2 Seawater ²²²Rn activity variation in Dongzhaigang Area during the wet and dry seasons

散-半固结岩类孔隙承压水主要分布于演丰镇—塔市一带,含水岩组顶板埋深为7.44~38.00 m,总体上由南向北、由东向西埋深逐渐增大,含水岩组厚度为0.6~31.2 m,水位埋深一般为10.0~20.0 m。该区域地下水总体由南向北、北西和北东方向呈放射状流动,主要以侧向排泄、垂直越流排泄于琼州海峡、南渡江河口及东寨港(图1)。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本研究于2021年7月(丰水期)和2022年1月(枯水期)分别在研究区采集河口河水样品5件、地下水样品5件、海水样品12件、底质沉积物9件。河水样品分别采集于演丰东河、演丰西河、演洲河、珠溪河、三江河等5条河流。为了保证样品的代表性,河水采样点尽量靠近每条河的河口处(图1)。地下水采样点布置在东寨港主要的红树林湿地内,空间上均匀分布于西南岸线。海水采样点充分考虑东寨港海湾内、外海水和陆岸淡水的影响,在湾内均匀布置采样

点。同时,为了分析东寨港区域海水中²²²Rn活度空间分布规律和估算SGD通量,采集海水样品17件(S1—S17)。由于底质沉积物较海水性质稳定、空间变异性较小,故仅在S1、S2、S4、S5、S6、S7、S11、S12、S15海水采样点位配套采集底质沉积物样品。

风速数据来源于环境气象数据服务平台^[20]。河流流域面积数据来源于海口市美兰区人民政府门户网站^[21]。河流入海流量数据来自海南省水务厅发布的《海南省水资源公报(2021)》^[22]。

丰水期与枯水期17个点位海水²²²Rn活度、半个潮汐周期海水²²²Rn活度连续监测数据用于研究东寨港水体氡同位素的时空分布特征,分析海水氡同位素的影响因素。此后,利用河水、地下水、海水及底质沉积物等数据,构建东寨港地区²²²Rn质量平衡模型,估算SGD通量及营养盐通量,本研究涉及的SGD范围见图1。

2.2 研究方法

海水氡活度在潮汐周期内处于动态平衡,因此需要严格控制海水样品采集时间,丰、枯2期海水样品

采集日干潮与满潮平均潮位均约 115 cm,海水样品选择于该潮位前后 1 h 内采集完成,保证样品采集时处于一致的潮水位而具有可比性。

将采集的水样转移到 RAD-7 型 α 能谱测氡仪 RAD-H₂O 测试模块 250 mL 玻璃瓶中并使用该仪器进行 ^{222}Rn 活度测试^[23]。记录采样时间与测样时间,使用 ^{222}Rn 衰变常数对测试结果进行修正以得到样品真实 ^{222}Rn 含量。同期,本研究于 2021 年 7 月 27 日 8:33—16:53,在演丰镇下厂村海岸以东 400 m 海边开展东寨港表层海水监测,每 10 min 进行一次测试。测试大气 ^{222}Rn 浓度时,将 RAD7 携带至目标点位,设置测试周期为 30 min,测试 2 个周期取平均值为该点位大气 ^{222}Rn 活度。

测定水体中的 ^{226}Ra 需要先利用锰纤维进行富集,利用刘建安^[24]、张成成^[25]、王希龙^[26]等应用的方法制备锰纤维柱。将锰纤维柱装入 60 mm×5 mm×170 mm 的圆柱形有机玻璃容器,容器两端连接阀门,富集后关闭阀门即可密封保存。将采集的孔隙水及地表水样品以小于 1 L/min 的流速通过锰纤维柱,分别利用 30, 60 L 水样使 ^{226}Ra 充分富集至锰纤维柱,用纯水洗去锰纤维柱上颗粒物和盐分,将锰纤维柱密封保存至少 20 d,使 ^{222}Rn 及其子体与 ^{226}Ra 达到衰变平衡,最后利用 RAD7 进行测量。测量时间设置为 10 h(测试 20 个周期,每个周期测试 30 min,取 20 个周期的平均值)以提高测试结果的准确性。样品中的 ^{226}Ra 活度(C_{Ra})计算公式为:

$$C_{\text{Ra}} = \frac{C_{\text{Rn}} V_{\text{t}}}{1\,000 V_{\text{sw}}} \quad (1)$$

式中: C_{Rn} ——测试管路中 ^{222}Rn 的活度/(Bq·m⁻³);

V_{t} ——测试管路的总体积/mL;

V_{sw} ——该样品富集的原始水样总体积/mL。

测试管路总体积包括测氡仪内腔容量 750 mL、干燥管体积 300 mL、锰纤维柱中空气体积 360 mL,共计 1 410 mL。

类似于水体 ^{226}Ra 测试,沉积物 ^{226}Ra 根据相同的原理进行测定。测试前,先将待测的沉积物样品冻干,然后将沉积物样品转移至 550 mL 容量的聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)塑料瓶中,加入去离子水,使用纯氯化钠将溶液盐度调至沉积物原生环境的盐度水平,略微挤压瓶身尽量排尽空气后密封保存 24 d 使沉积物释放 ^{222}Rn 达到平衡。测试前将样品摇晃使瓶内溶液中 ^{222}Rn 均匀,自然静置待沉积物沉降至瓶底后,取上清液测定 ^{222}Rn 活度。

此外,本研究中的常规理化指标,如 pH、盐度,均

使用 HACH HQ2200 便携式多参数双通道分析仪在采样现场进行测定,测试流程严格参照相关技术规范。

常规的数理统计使用 Excel 软件完成。地理制图与空间分析使用 ArcGIS10.8 完成。相关性分析使用 Origin2024 软件完成。

3 结果

3.1 东寨港区域 ^{222}Rn 特征

3.1.1 海水 ^{222}Rn 活度特征

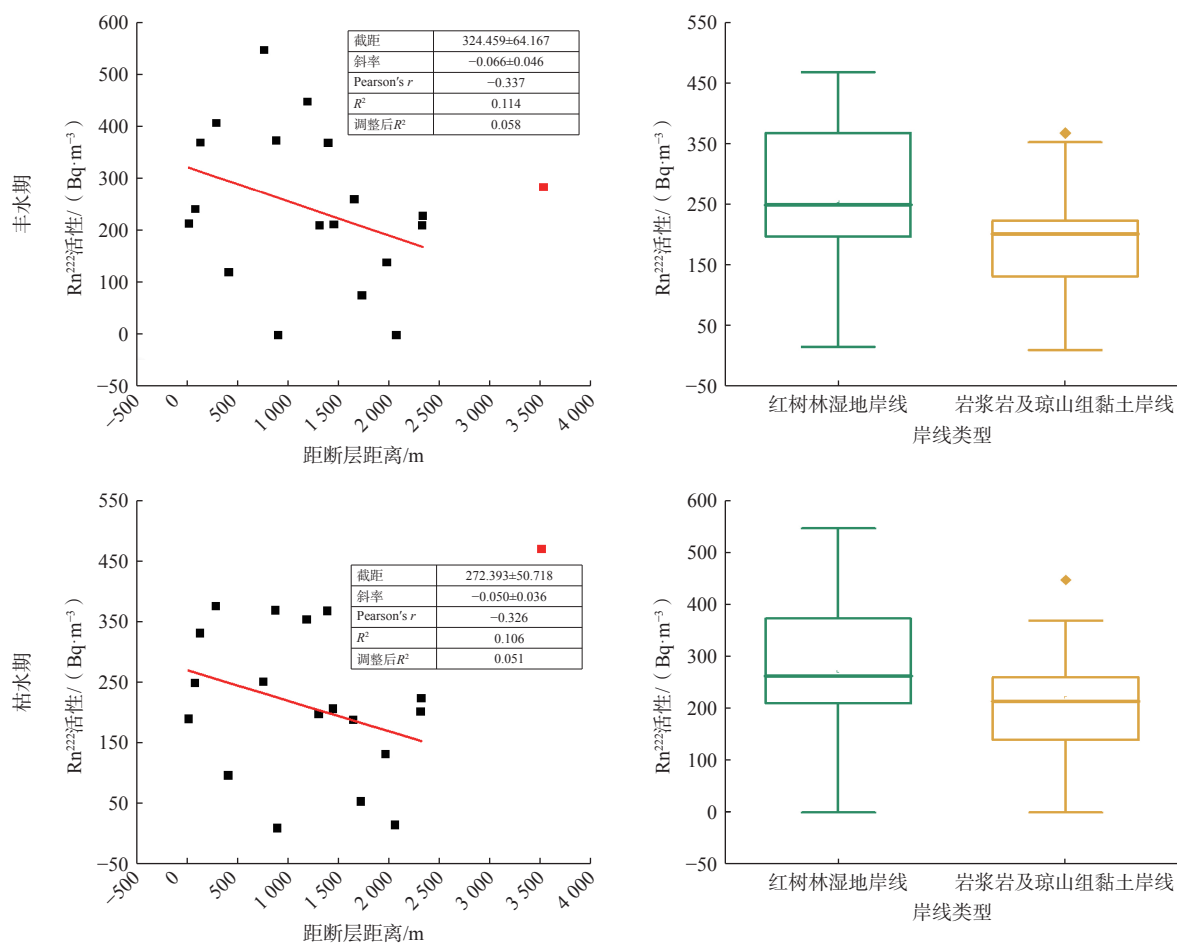
东寨港海水 ^{222}Rn 活度空间分布特征见图 2。丰水期(2021 年 7 月)海水 ^{222}Rn 活度最小值未检出,最大值为 549.38 Bq/m³,平均值为 249.06 Bq/m³;枯水期(2022 年 1 月)海水 ^{222}Rn 活度为 18 ~ 472.60 Bq/m³,平均值为 227.05 Bq/m³。总体上,丰水期海水 ^{222}Rn 活度高于枯水期。空间上,东寨港水体 ^{222}Rn 活度总体呈南部海湾>北部湾口>中部水体,港湾东侧水体>港湾西侧水体。

根据东寨港出露地层岩性、沉积物类型、断裂空间分布等特征,利用 ArcGIS 和 Origin 软件分析海水采样点距断裂带距离、海岸沉积物类型、距海岸线距离、水深、距东寨港入海口的距离、距河口距离等空间因素与海水中 ^{222}Rn 活度的关系,结果显示东寨港海水 ^{222}Rn 活度与海岸沉积物类型和距断裂带的距离相关性较显著。红树林湿地地区水体 ^{222}Rn 活度大于岩浆岩基岩及琼山组黏土岸线区水体 ^{222}Rn 活度,丰水期和枯水期海水中 ^{222}Rn 活度与距断裂带的距离表现出一定的负相关(图 3)。

此外,少量点位偏离了整体趋势,这是由于其他因素影响了 SGD 的强度。如 S6、S7、S13 点,由于东西两侧的岸线均修建了硬质人工海堤护岸,改变了海陆过渡带的地貌条件,相对隔绝了海陆之间的物质交换,造成相应点位海水 ^{222}Rn 活度较小。S12、S13、S14 点总体背景条件相似,仅岸线与断裂带之间的位置关系有较大区别,S13 点位断裂带位于人工海堤的陆侧,其海水 ^{222}Rn 活度显著低于断裂带位于人工海堤海侧 S12、S14 点。由于 S3、S5、S17 点表层沉积物松散,导水系数较高,增强了 SGD 效应,导致相应点位海水 ^{222}Rn 活度较高。

3.1.2 潮汐作用影响下 ^{222}Rn 活度变化特征

东寨港内表层海水盐度和电导率表现出和潮汐水位较强的相关性,涨潮时盐度和电导率分别从 25.1‰、44.4 mS/cm 上升至 35.3‰、60.1 mS/cm;退潮时盐度和电导率与潮水位的变化存在一定的滞后性,在达到高潮位后维持稳定约 2 h 后逐渐下降至 34.8‰、

图 3 东寨港海水²²²Rn 活度与环境因子相关性分析Fig. 3 Correlation of seawater ²²²Rn activity with environmental factors in Dongzhaigang Area

59.9 mS/cm。涨潮初期,海水²²²Rn 活度呈下降趋势,最高潮水位前约 1.5 h,海水²²²Rn 活度开始缓慢上升,开始退潮后上升的速率增大(图 4)。

3.2 基于²²²Rn 质量平衡模型的东寨港 SGD 定量估算

在潮汐和波浪的驱动下,东寨港海水²²²Rn 活度在一定范围内波动,基本处于动态平衡,即港湾内²²²Rn 输入量与损失量基本相等。在自然环境下,潟湖海水中²²²Rn 源项包括:排泄进入潟湖河流的输入、底质扩散、潟湖海水²²⁶Ra 衰变、地下水排泄输入;汇项包括²²²Rn 自然放射性衰变、水-气界面²²²Rn 逸散、潮汐驱动湾口内外海水的损失^[27-28]。²²²Rn 质量平衡模型为:

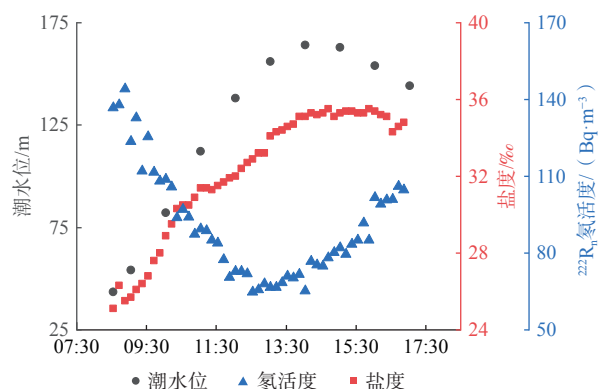
$$J_{\text{SGD}} + J_{\text{R}} + J_{\text{Ra}} + J_{\text{S}} = J_{\text{d}} + J_{\text{A}} + J_{\text{M}} \quad (2)$$

式中: J_{SGD} ——地下水输入的²²²Rn/(Bq·d⁻¹);

J_{R} ——河水输入的²²²Rn/(Bq·d⁻¹);

J_{Ra} ——海水中²²⁶Ra 衰变作用下产生的²²²Rn/(Bq·d⁻¹);

J_{S} ——底质扩散进入海水中的²²²Rn/(Bq·d⁻¹);

图 4 东寨港一个潮汐周期内的²²²Rn 活度变化Fig. 4 ²²²Rn activity variation over a tidal cycle in Dongzhaigang Area

J_{d} ——²²²Rn 自然衰变的损失量/(Bq·d⁻¹);

J_{A} ——水-气界面逸散进入大气的²²²Rn 损失量/(Bq·d⁻¹);

J_{M} ——潮汐驱动下湾口内外水体间的²²²Rn 损失量/(Bq·d⁻¹)。

利用该质量平衡模型对东寨港海底地下水排泄

通量进行估算。

3.2.1 河流量

河流径流量主要由降水量、蒸发量、入渗量控制。由于研究区 5 条排泄进入东寨港潟湖的河流规模较小,没有设置入海口水文监测站,故缺乏相关的水文监测数据。研究区附近的南渡江与 5 条河流具有相似径流条件,理论上产流系数相差不大。本研究不考虑产流系数的差异,利用平均入海流量、流域面积、丰水期、枯水期降雨量等参数,对 5 条河流丰水期和枯水期入海径流速率进行估算,结果见表 1。

表 1 河流平均入海径流速率

Table 1 Average rates of runoff to the sea from different rivers in Dongzhaigang Area

河流名称	流域面积 /km ²	丰水期平均径流速率 /(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	枯水期平均径流速率 /(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
三江河	240.00	121.57	30.39
演洲河	253.00	128.16	32.04
演丰东河	76.70	38.85	9.71
珠溪河	350.00	177.30	44.32
演丰西河	45.27	22.93	5.73

利用河流平均径流速率与该河流河口海水²²²Rn活度的乘积即可估算河流²²²Rn补给量,结果见表 2。丰水期东寨港海水受河流补给²²²Rn通量为 1.21×10⁹ Bq/d,枯水期为 3.40×10⁸ Bq/d。

表 2 河流输入²²²Rn 通量

Table 2 Statistical of ²²²Rn fluxes from different river inputs in Dongzhaigang Area

河流	丰水期 ²²² Rn活度 /(Bq·m ⁻³)	丰水期 ²²² Rn输入量 /(10 ⁸ Bq·d ⁻¹)	枯水期 ²²² Rn活度 /(Bq·m ⁻³)	枯水期 ²²² Rn输入量 /(10 ⁸ Bq·d ⁻¹)
三江河	160.73	1.95	201.53	0.61
演洲河	351.95	4.51	376.03	1.20
演丰东河	256.28	1.00	310.10	0.30
珠溪河	147.91	2.62	178.04	0.79
演丰西河	864.34	1.98	863.54	0.50
合计		12.1		3.40

3.2.2 潮汐驱动内外水体交换²²²Rn 通量

在潮汐作用驱动下,东寨港潟湖与湾外海水不断进行交换。涨潮时湾外海水向湾内补给,带来一定²²²Rn输入量,落潮时湾内海水向湾外排泄,形成²²²Rn损失量。潮汐作用驱动的²²²Rn输入量(J_{in})、损失量(J_{out})分别为^[29-30]:

$$J_{in} = \frac{H_{t+\Delta t} - H_t}{\Delta t} (b\bar{C}_w + (1-b)C_{off})S \quad (3)$$

$$J_{out} = \frac{H_t - H_{t+\Delta t}}{\Delta t} C_t S \quad (4)$$

式中: $H_{t+\Delta t}$ ——东寨港 $t+\Delta t$ 时水深/m;

H_t ——东寨港 t 时刻水深/m;

$\bar{C}_w$ ——东寨港内海水²²²Rn 平均活度/(Bq·m⁻³);

$\Delta H = H_t - H_{t+\Delta t}$ —— $t+\Delta t$ 时刻与 t 时刻的潮差/m;

C_{off} ——涨潮时补给湾内的外海海水²²²Rn 活度/(Bq·m⁻³);

C_t ——落潮时港内向港外排泄的海水²²²Rn 活度/(Bq·m⁻³);

b ——回流因子;

Δt ——潮差时间区间/h;

S ——东寨港平均水面面积/km²。

丰水期海湾内海水²²²Rn 平均活度为 249.06 Bq/m³,枯水期为 227.05 Bq/m³。 b 值为东寨港港内海水中来自海湾外海水组分比例^[31],使用湾内平均盐度与外海海水盐度的比值作为其近似值。根据实测样品的盐度值,使用湾口样品盐度代表外海盐度,得到丰水期 b 值为 0.63,枯水期为 0.75。以涨潮后期接近满潮时湾口海水样品²²²Rn 活度代表外海海水²²²Rn 活度,丰水期 C_{off} 为 138.53 Bq/m³;枯水期 C_{off} 为 107.5 Bq/m³。

东寨港内外水体交换由潮汐作用驱动,通量速率也随潮汐周期变化而变化。为保证数据的代表性和科学性,港内外海水整体交换通量采用平均满潮与干潮的最大潮差($\Delta H=0.8$ m)、半个潮汐周期($\Delta t=6$ h)、东寨港海湾面积(高、低潮水面面积平均值 $S=51.855$ km²)等参数,以港内最接近湾口的样品 S11 的²²²Rn 活度代表排泄出湾口的²²²Rn 活度,由此得到丰水期 C_t 为 211.53 Bq/m³,枯水期 C_t 为 182.57 Bq/m³。丰水期 J_{in} 为 3.45×10¹⁰ Bq/d, J_{out} 为 3.51×10¹⁰ Bq/d;枯水期 J_{in} 为 3.27×10¹⁰ Bq/d, J_{out} 为 3.31×10¹⁰ Bq/d。

3.2.3 水-气界面²²²Rn 损失通量

氡是一种惰性气体元素,其在水中的溶解度较小,微溶于水。自然状态下,海水和大气中的²²²Rn 处于不平衡状态,²²²Rn 不断在水-气界面从水中向大气中逸散。水-气界面的²²²Rn 损失通量为^[32]:

$$F_A = k(C_w - \alpha C_A) \quad (5)$$

$$\alpha = 0.105 + 0.405e^{-0.0502T} \quad (6)$$

式中: F_A ——水-气界面²²²Rn 平均损失速率/(Bq·m⁻²·h⁻¹);

C_w ——海水²²²Rn 平均活度以计算水-气界面²²²Rn 的平均损失通量/(Bq·m⁻³),丰水期 $C_w=249.06$ Bq/m³,枯水期 $C_w=227.05$ Bq/m³;

C_A ——大气中²²²Rn 活度/(Bq·m⁻³),现场实测。丰水期 $C_A=5.4$ Bq/m³,枯水期 $C_A=4.8$ Bq/m³;

α ——水相与气相间平衡时 ^{222}Rn 的分配系数;

k ——水面附近区域气体传质速率/($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$), 主要受到风速、流量、水深的影响^[33];

T ——气温/ $^{\circ}\text{C}$

本研究 k 值根据以下方程计算^[15, 34]:

$$k = \begin{cases} 0.45u^{1.6} \left(\frac{S_c}{600}\right)^{-0.5} & u > 3.6 \\ 0.45u^{1.6} \left(\frac{S_c}{600}\right)^{-\frac{2}{3}} & u \leq 3.6 \end{cases} \quad (7)$$

其中, u 是东寨港海面上的风速,根据气象数据,丰水期(7月)海口市月平均风速 $u=2.4\text{ m/s}$,枯水期(1月)海口市月平均风速 $u=2.5\text{ m/s}$ 。 S_c 是无量纲的施密特常数^[35]:

$$S_c = 3417.6e^{-0.0637T} \quad (8)$$

其中, T 为气温,丰水期(7月)海口市月平均气温 $T=29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,枯水期(1月)海口市月平均气温 $T=19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

丰水期水-气界面 ^{222}Rn 平均损失速率为 $117.65\text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,枯水期为 $75.14\text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。该数值与东寨港平均水面面积的乘积即为东寨港区域水-气界面 ^{222}Rn 总损失通量,丰水期 J_A 为 $6.10\times 10^9\text{ Bq/d}$,枯水期 J_A 为 $3.90\times 10^9\text{ Bq/d}$ 。

3.2.4 底质扩散通量

海水与底质界面两侧生成 ^{222}Rn 的速率差异很大, ^{222}Rn 活度不平衡,其由底质界面向海水中扩散。底质向海水的 ^{222}Rn 扩散通量为^[36]:

$$F_s = (\lambda_{\text{Rn}} D_s)^{0.5} (C_{\text{eq}} - C_0) \quad (9)$$

式中: F_s ——底质-海水界面 ^{222}Rn 扩散速率/($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$);

λ_{Rn} —— ^{222}Rn 自然衰变常数/ d^{-1} , λ 为 0.181 d^{-1} ;

D_s —— ^{222}Rn 分子扩散系数/($\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$);

C_0 ——底质-海水界面海水 ^{222}Rn 活度/($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), 本研究中东寨港海水深度很低,直接使用表层海水 ^{222}Rn 活度进行计算;

C_{eq} ——不考虑与外界交换作用情况下,底质与底质中孔隙水两相 ^{222}Rn 达到平衡时孔隙水 ^{222}Rn 活度/($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)。

C_{eq} 使用沉积物 ^{222}Rn 释放速率(C_{sed})、底质密度(ρ)、底质孔隙度(n)计算^[37]:

$$C_{\text{eq}} = \frac{C_{\text{sed}} \times \rho}{n} \quad (10)$$

9件沉积物样品 C_{eq} 为 $7\ 683.86 \sim 32\ 432.14\text{ Bq}/\text{m}^3$,平均值为 $13\ 906.36\text{ Bq}/\text{m}^3$ 。

本研究9件沉积物的孔隙度为 $0.44 \sim 0.63$,对应沉积物的 D_s 可通过以下关系式获得^[38]:

$$D_s = 8.64n10^{-\left(\frac{980}{273.15+T}+1.59\right)} \quad (11)$$

丰水期 D_s 为 $5.70\times 10^{-5} \sim 8.21\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{d}$,平均值为 $7.01\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{d}$;枯水期为 $4.69\times 10^{-5} \sim 6.91\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{d}$,平均值为 $5.67\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{d}$ 。

丰水期9个点位底质 ^{222}Rn 输入速率为 $23.49 \sim 108.06\text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,平均值为 $48.54\text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;枯水期为 $21.41 \sim 95.96\text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,平均值为 $43.59\text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。其平均值与东寨港平均水面面积乘积即为东寨港区域底质输入 ^{222}Rn 总通量,丰水期为 $2.52\times 10^9\text{ Bq/d}$,枯水期为 $2.26\times 10^9\text{ Bq/d}$ 。

3.2.5 放射性衰变损失通量

^{222}Rn 是一种放射性同位素,自身在不断衰变。根据衰变方程, ^{222}Rn 衰变损失量为:

$$J_d = I_{\text{Rn}} \lambda_{\text{Rn}} \quad (12)$$

$$I_{\text{Rn}} = \overline{C_i H_i} S \quad (13)$$

式中: I_{Rn} ——东寨港海水中赋存的 ^{222}Rn 总量/ Bq ;

C_i ——采样点位海水 ^{222}Rn 活度/($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$);

H_i ——采样点位海水 ^{222}Rn 平均水深/ m ;

$\overline{C_i H_i}$ ——所有采样点位 C_i 与 H_i 乘积的平均值;

S ——东寨港高低潮的水面面积平均值/ km^2 , $S=51.855\text{ km}^2$ 。

由此计算,丰水期东寨港 ^{222}Rn 的自然衰变损失通量为 $3.26\times 10^9\text{ Bq/d}$,枯水期为 $2.97\times 10^9\text{ Bq/d}$ 。

3.2.6 母体放射性衰变输入

^{222}Rn 的母体元素 ^{226}Ra 在不断地发生自然衰变产生 ^{222}Rn ,东寨港内海水 ^{226}Ra 自然衰变产生的 ^{222}Rn 通量可通过以下关系式计算:

$$J_{\text{Ra}} = 86\ 400 I_{\text{Ra}} \left(1 - 0.819 \frac{1}{86\ 400}\right) \quad (14)$$

$$I_{\text{Ra}} = \overline{C_{\text{Ra}}} \overline{H} S \quad (15)$$

式中: I_{Ra} ——东寨港海水中赋存的 ^{226}Ra / Bq ;

$\overline{C_{\text{Ra}}}$ ——东寨港海水 ^{226}Ra 的平均活度/($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$);

$\overline{H}$ ——东寨港的平均水深/ m 。

由此计算,丰水期东寨港海水中 Ra 自然衰变引起的 ^{222}Rn 输入量为 $5.30\times 10^7\text{ Bq/d}$,枯水期为 $5.10\times 10^7\text{ Bq/d}$ 。

3.2.7 SGD估算结果

根据以上东寨港海水 ^{222}Rn 的各个源汇项, ^{222}Rn 的总损失量减去总补给量的差值,丰水期为 $6.14\times 10^9\text{ Bq/d}$,枯水期为 $4.57\times 10^9\text{ Bq/d}$ 。根据东寨港海水 ^{222}Rn 监测结果,海水中 ^{222}Rn 活度处于动态平衡,总体维持基本稳定。在质量平衡模型中,东寨港海水 ^{222}Rn

补给量和损失量应大致相等, 源汇项的差值即为地下水端元补给的 ^{222}Rn 通量(图 5)。根据实测的地下水端元 ^{222}Rn 活度得到丰水期东寨港海底地下水排泄通量为 $2.66 \times 10^5 \sim 5.76 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$, 排泄速率为 $0.51 \sim 11.1 \text{ cm/d}$; 枯水期地下水排泄通量为 $1.98 \times 10^5 \sim 5.09 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$, 排泄速率为 $0.38 \sim 9.77 \text{ cm/d}$ 。使用地下水样品 ^{222}Rn 活度平均值获得丰水期海底地下水排泄通量为 $8.90 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,

平均排泄速率为 1.72 cm/d ; 枯水期地下水排泄通量为 $6.84 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均排泄速率为 1.32 cm/d 。利用丰、枯水期样品获取的营养盐数据与地下水样品 ^{222}Rn 平均活度估算的 SGD 通量, 获得海底地下水排泄的营养盐通量。丰水期地下水排泄的磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐通量分别为 $6\,440, 53.44, 1\,084 \text{ kg/d}$, 枯水期营养盐排泄通量分别为 $4\,293, 34.93, 742.46 \text{ kg/d}$ 。

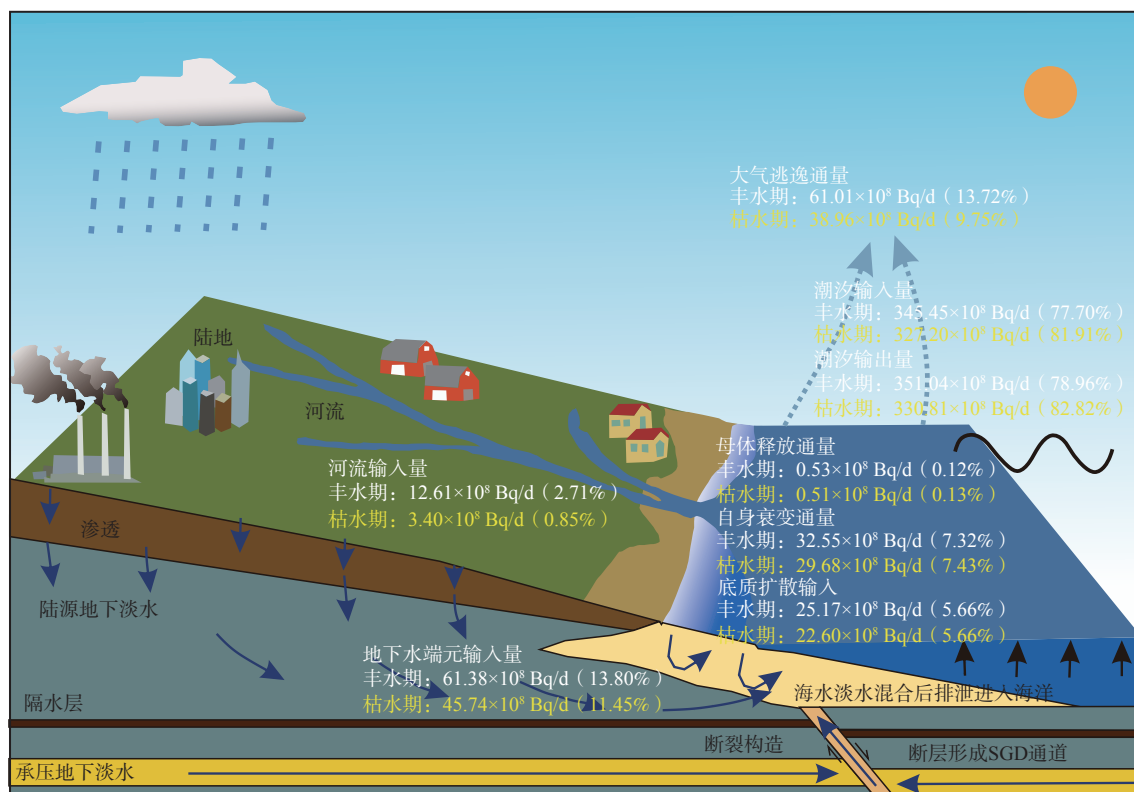


图 5 ^{222}Rn 质量平衡模型源汇项示意图

Fig. 5 Schematic representation of the source-sink terms of the ^{222}Rn mass balance model in Dongzhaigang Area

4 分析与讨论

4.1 东寨港海水 ^{222}Rn 活度时空变异性影响因素

丰水期东寨港海水与潜水孔隙水 ^{222}Rn 活度比枯水期分别高 10% 和 3%, 表明丰水期潮汐诱导的再循环海水相对于枯水期水量降低且在海底海岸沉积物孔隙中停留时间减少。因为潮汐驱动着海水在海底海岸沉积物中的再循环, 与陆源地下淡水混合形成一个盐水羽, 丰水期补给区降雨入渗量增大, 地下水水头值升高, 陆源地下淡水径流排泄强度增大, 改变再循环海水和陆源地下淡水混合作用中二者的强度差异, 削弱了海水再循环作用强度, 导致上述盐水羽的压缩^[39-40]。

海水 ^{222}Rn 活度在一个潮汐周期内的变化表明港

湾内水体是潮汐驱动下高盐度海水和淡水的混合水。从潮汐周期中 ^{222}Rn 溶解活度动态平衡过程进行分析, 总体上源汇量大致相等, 而涨潮过程中低 ^{222}Rn 活度外海海水的流入将导致港内水体活度下降, 低 ^{222}Rn 活度河水输入量减少将导致港内水体 ^{222}Rn 活度上升。除地下水端元外, 衰变通量、大气逃逸通量、底质释放通量、母体衰变通量基本不受潮汐过程影响。根据东寨港丰水期海水数据, 如果仅考虑东寨港内外水体之间的 ^{222}Rn 活度差异, 采用简单的溶质混合模型进行估算, 低潮位涨至高潮位后, 东寨港水体 ^{222}Rn 活度应下降约 23.99%, 然而在连续监测过程中发现其活度值实际下降了 32.87%。这一现象表明在涨潮过程中地下水端元的 ^{222}Rn 输入量也降低了。在涨潮初期东寨港海水 ^{222}Rn 活度的下降和退潮时的上升

是潮汐驱动作用下海底循环海水存在的特征,说明涨潮时孔隙水向海水的排泄减少,海水向孔隙水的入渗增加,退潮时孔隙水向海水排泄增加^[41]。在涨潮的中后期,水中²²²Rn活度存在一段时间的稳定期,这是波浪作用驱动海底循环海水排放增大的结果。随着水深增加,波浪作用增大,海底底质孔隙水与海水间的交换作用增强,造成海底循环海水排放增加,维持海水²²²Rn活度稳定。

东寨港北段以及南段的東西两侧岸线发育着大规模的烟墩组(Qh_{3y})灰白色、灰黄色中粗砂、中细砂、海滩砂和海湾淤泥。西岸中部主要发育中更新统多文组(Qp_{2d})火山岩,岩性以辉石橄榄玄武岩、橄榄辉石玄武岩为主,火山岩顶部常发育有较厚的红土风化壳。东岸中部虽发育烟墩组沉积物,但其规模和厚度都较小,沉积物主要为灰黄色粉砂质黏土(黏土比例约为85%)、棕褐色泥炭层和青灰色淤泥质黏土(黏土比例>95%)。烟墩组滨海-潟湖相沉积物红树林湿地海岸海水²²²Rn活度明显高于多文组火山岩地层和琼山组黏土沉积物海岸,表明烟墩组滨海-潟湖沉积物区SGD作用相对更强。因其具有一定的含水性、透水性,其中赋存了一部分由深部承压水补给和地表水入渗形成的潜水孔隙水,作为陆源地下淡水向东寨港排泄,其中部分孔隙水可能以潮汐作用驱动的再循环海水形式排放。

东寨港地区断层构造广泛发育,在铺前一清澜活动断裂构造作用下,东寨港内形成了一系列断层。东寨港西侧边缘北北西向演丰-三江断裂为东倾的正断层,长约5 km,该断裂最新活动时间为中晚更新世之后;东寨港东侧边缘近南北向铺前三江断裂为全新世活动断裂^[42](图2)。两条断层发育规模大、地层错距宽、活跃年代新^[43]。在丰水期和枯水期,东寨港海水²²²Rn活度随着距两条断层距离的增加明显降低,均表现出一定的负相关关系。这个现象表明断层构造可能构成陆源地下淡水排泄通道,地下深部形成的²²²Rn随着地下水一同排出。丰水期陆源地下淡水排泄作用强,通过断裂带向东寨港海水中输入的²²²Rn含量较大,距离断裂带附近区域海水²²²Rn活度明显上升。枯水期陆源地下水排泄作用弱,断裂带附近区域海水²²²Rn活度上升不明显。综上所述,东寨港周缘的微承压水、承压水可能通过断层构造进入地下河口区域,在底质沉积物孔隙中与入渗的再循环海水、潜水地下孔隙水混合后,排泄进入东寨港,尤其是在丰水期,贡献了一定量的陆源地下淡水及溶质通量。

4.2 SGD对滨海湿地红树林生境的影响

东寨港海底地下水排泄的水量十分可观。与东寨港周缘5条入海河流流量相比,丰水期地下水排泄的水量最小值略大于演丰西河流量,枯水期约为演丰东河流量的2倍;丰水期地下水排泄通量的最大值略大于5条河流的流量之和,枯水期约为5条河流流量之和的4倍。地下水排泄通量包括陆源地下淡水和海底再循环海水2部分,丰水期陆源地下淡水的增加会压缩再循环海水的生成,造成再循环海水量减少。丰水期陆源地下淡水排泄通量大于海底地下水排泄总量与枯水期的差值,与演丰西河的流量水平接近。佘祥城等^[44]研究显示北部湾地区SGD速率夏季和冬季分别是4.16, 2.88 cm/d,东寨港地区SGD速率低于该地区,且丰、枯两期的差异更小。此外,东寨港水深更浅规模更小,SGD带来的水量占据了港内水体相对更大比例,其对环境的影响相对更大。陆源地下淡水向东寨港输送陆源物质,海底再循环海水也会在沉积物中发生溶质的交换和溶质形态的转换,都会对东寨港海水水质产生影响。本研究估算东寨港地区地下水排泄输送的磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐通量分别占地表水输送通量的1/3, 1/8, 1/4,流量相当于东寨港地区的“第六条河流”,表明海底地下水排泄的水量和营养盐对东寨港海域环境的影响不可忽略。

一般地,潮间带地区一定的盐度水平是控制红树林生长发育的关键因子^[45]。海岸带地区SGD排泄的大量陆地淡水稀释了红树林湿地地区地表水及孔隙潜水,降低了滩涂区孔隙水及涨潮时所覆盖海水的盐度。近年来,世界海岸带地区研究表明陆源污染物的输入已经成为近岸海域污染的重要来源之一。特别是总氮、总磷,二者不仅是近岸海水富营养化的关键影响因子,也是影响光背团水虱产生的主要水质因子。东寨港红树林湿地曾经受到团水虱爆发影响,导致大面积红树林死亡。养殖塘高营养盐含量废水是东寨港地区陆源营养物质的主要来源之一,其通过渗漏进入地下含水层,再经过SGD过程输入红树林湿地地区,影响红树林湿地水质。综上所述,SGD排泄的淡水及其营养盐通过降低红树林生境的盐度和(或)破坏红树林湿地环境,可能对红树林生境产生负面影响,最终影响红树林的生长发育。实际上,东寨港红树林湿地中的红树植被主要发育于西岸的演丰东河、演丰西河及南部的三江镇三江河、演州河等河口地区,这些地区的SGD通量都较小;而在SGD通量更大的东寨港红树林湿地东岸地区,红树林湿地发育的规

模最小或不发育。这一现象表明 SGD 可能通过降低红树林湿地盐度或环境质量对东寨港红树林湿地生境产生负面影响。

5 结论

(1)东寨港红树林湿地区存在海底地下水排泄,地下水排泄具有明显的时空异质性。丰水期海水²²²Rn活度高于枯水期。东寨港水体²²²Rn活度总体呈南部海湾>北部湾口>中部水体,港湾东侧水体>港湾西侧水体特征。地下水排泄的时空异质性主要受潮汐作用、含水层介质、断裂的空间展布等因素影响。

(2)东寨港红树林湿地区海底地下水排泄通量丰水期为 $2.66 \times 10^5 \sim 5.76 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$,平均值为 $8.90 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$;枯水期为 $1.98 \times 10^5 \sim 5.09 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$,平均值为 $6.84 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。丰水期海底地下水排泄的磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐的通量分别为 6 440, 53.44, 1 084 kg/d, 枯水期分别为 4 293, 34.93, 742.46 kg/d。东寨港红树林湿地区地下水排泄通量十分可观,是东寨港地区的“第六条河流”。

(3)东寨港 SGD 对红树林生境的影响不可忽略,SGD 可能通过降低红树林湿地盐度或环境质量对东寨港红树林湿地生境产生负面影响。

参考文献 (References) :

- [1] 王焰新,甘义群,邓娅敏,等.海岸带海陆交互作用过程及其生态环境效应研究进展[J].地质科技通报,2020,39(1):1-10. [WANG Yanxin, GAN Yiqun, DENG Yamin, et al. Land-ocean interactions and their eco-environmental effects in the coastal zone: Current progress and future perspectives[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王学静,郭伟钊,于胜超,等.砂质海岸地下水营养盐迁移转化过程与入海排泄[J].水文地质工程地质,2025,52(1):12-22. [WANG Xuejing, GUO Yifan, YU Shengchao, et al. Nutrient dynamics and discharge in a coastal sandy beach aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 12-22. (in Chinese with English abstract)]
- [3] ALONGI D, TROTT L, WATTAYAKORN G, et al. Below-ground nitrogen cycling in relation to net canopy production in mangrove forests of southern Thailand[J]. Marine Biology, 2002, 140(4): 855-864.
- [4] 但新球,廖宝文,吴照柏,等.中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J].生态环境学报,2016,25(7): 1237-1243. [DAN Xinqiu, LIAO Baowen, WU Zhaobai, et al. Resources, conservation status and main threats of mangrove wetlands in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(7): 1237-1243. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杨盛昌,陆文勋,邹祯,等.中国红树林湿地:分布、种类组成及其保护[J].亚热带植物科学,2017,46(4): 301-310. [YANG Shengchang, LU Wenxun, ZOU Zhen, et al. Mangrove wetlands: Distribution, species composition and protection in China[J]. Subtropical Plant Science, 2017, 46(4): 301-310. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 周满迷,廖宝文,熊燕梅,等.中山市红树林资源现状及修复策略[J].林业科技通讯,2022(8): 25-27. [ZHOU Manmi, LIAO Baowen, XIONG Yanmei, et al. Current status and restoration strategies of mangrove resources in Zhongshan city[J]. Forest Science and Technology, 2022(8): 25-27. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 叶玉玲,廖小青,刘贯群.国内外地下水入海通量研究现状与趋势[J].水文地质工程地质,2006,33(6): 124-128. [YE Yuling, LIAO Xiaoqing, LIU Guanqun. A review of submarine groundwater discharge home and abroad[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(6): 124-128. (in Chinese with English abstract)]
- [8] MOORE W S. The subterranean estuary: A reaction zone of ground water and sea water[J]. Marine Chemistry, 1999, 65(1/2): 111-125.
- [9] KROEGER K D, SWARZENSKI P W, GREENWOOD W J, et al. Submarine groundwater discharge to Tampa Bay: Nutrient fluxes and biogeochemistry of the coastal aquifer[J]. Marine Chemistry, 2007, 104(1/2): 85-97.
- [10] LUO Xin, JIAO J J. Submarine groundwater discharge and nutrient loadings in Tolo Harbor, Hong Kong using multiple geotracer-based models, and their implications of red tide outbreaks[J]. Water Research, 2016, 102: 11-31.
- [11] WANG Guizhi, WANG Zhangyong, ZHAI Weidong, et al. Net subterranean estuarine export fluxes of dissolved inorganic C, N, P, Si, and total alkalinity into the Jiulong River estuary, China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015, 149: 103-114.
- [12] SU Ni, DU Jinzhou, MOORE W S, et al. An examination of groundwater discharge and the associated nutrient fluxes into the estuaries of eastern Hainan Island, China using ²²⁶Ra[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(19): 3909-3918.

- [13] HEISS J W, MICHAEL H A. Saltwater-freshwater mixing dynamics in a sandy beach aquifer over tidal, spring-neap, and seasonal cycles[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(8): 6747 – 6766.
- [14] QU Wenjing, LI Hailong, WAN Li, et al. Numerical simulations of steady-state salinity distribution and submarine groundwater discharges in homogeneous anisotropic coastal aquifers[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 74: 318 – 328.
- [15] LAMBERT M J, BURNETT W C. Submarine groundwater discharge estimates at a Florida coastal site based on continuous Radon measurements[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66(1): 55 – 73.
- [16] 黄怡萌. 氡同位素示踪渤海湾西部海底地下水排泄[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [HUANG Yimeng. Evaluation of submarine groundwater discharge into the west of Bohai Bay, China using ^{222}Rn [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王亚丽. 北部湾典型红树林区域海底地下水排放的碳通量及其光学特征 [D]. 上海: 华东师范大学, 2020. [WANG Yali. Carbon fluxes by submarine groundwater discharge and its optical characteristics in typical mangrove areas of the Beibu gulf[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [18] DOUGLAS A R, MURGULET D, PETERSON R N. Submarine groundwater discharge in an anthropogenically disturbed, semi-arid estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 580: 124369.
- [19] SMERDON B D, PAYTON GARDNER W, HARRINGTON G A, et al. Identifying the contribution of regional groundwater to the baseflow of a tropical river (Daly River, Australia) [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 107 – 115.
- [20] 环境气象数据服务平台. 全球地面气象数据逐时数据(美兰站) [DS/OL]. (2022-01-07) [2023-05-31]. [Environmental meteorological data service platform. Global Surface Meteorological Data Hourly Data (Meilan Station). [DS/OL]. (2022-01-07) [2023-05-31]. http://eia-data.com/isd_map/. (in Chinese)]
- [21] 海口市美兰区人民政府. 河流·地下水 [EB/OL]. (2022-12-06) [2023-05-31]. [People's Government of Meilan District, Haikou City. Rivers-groundwater [EB/OL]. (2022-12-06) [2023-05-31]. <http://mlqzf.haikou.gov.cn/qq/zrdl/202112/t511345.shtml>. (in Chinese)]
- [22] 海南省水务厅. 海南省水资源公报(2021 年) [EB/OL]. (2022-09-27) [2023-05-31]. [Hainan Provincial Water Affairs Bureau. Water Resources Bulletin of Hainan Province (2021) [EB/OL]. (2022-09-27) [2023-05-31]. <https://swt.hainan.gov.cn/sswt/1801/202209/55178e92fdb4ffcb0f1cb25807fb548.shtml>. (in Chinese)]
- [23] 汪迁迁. 镭氡同位素评估渤海湾海底地下水排泄及其陆源物质输送通量 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [WANG Qianqian. Estimating submarine groundwater discharge (SGD) and its associated terrestrial material fluxes into Bohai Bay using radium and radon isotopes[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘建安. 基于镭同位素评估河口和近海海底地下水排放及其环境效应 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019. [LIU Jianan. Evaluating submarine groundwater discharge and its effects on eco-environment in estuarine and coastal waters by radium isotopes[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张成成. 镭同位素评估辽东湾海底地下水排泄及其携带营养盐通量 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [ZHANG Chengcheng. Estimating submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes into Liaodong Bay using radium isotopes[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王希龙. 我国近海典型区域的海底地下水排放(SGD)及其营养盐通量研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017. [WANG Xilong. Study on submarine groundwater discharge (SGD) and its driven nutrient fluxes from typical area in coastal sea of China[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [27] ZHANG Yan, LI Hailong, WANG Xuejing, et al. Estimation of submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes in eastern Laizhou Bay, China using ^{222}Rn [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 103 – 113.
- [28] WANG Xilong, BASKARAN M, SU Kaijun, et al. The important role of submarine groundwater discharge (SGD) to derive nutrient fluxes into River dominated Ocean Margins—The east China sea [J]. *Marine Chemistry*, 2018, 204: 121 – 132.
- [29] CHEN Xiaogang, ZHANG Fenfen, LAO Yanling, et al. Submarine groundwater discharge-derived carbon fluxes in mangroves: An important component of blue carbon

- budgets?[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(9): 6962 – 6979.
- [30] MOORE W S, BLANTON J O, JOYE S B. Estimates of flushing times, submarine groundwater discharge, and nutrient fluxes to Okatee Estuary, South Carolina[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C9): C09006.
- [31] BURNETT W C, AGGARWAL P K, AURELI A, et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(2/3): 498 – 543.
- [32] BANERJEE S. *The Air-Water interface: Turbulence and scalar exchange*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 87 – 101.
- [33] ZAPPA C J, RAYMOND P A, TERRAY E A, et al. Variation in surface turbulence and the gas transfer velocity over a tidal cycle in a macro-tidal estuary[J]. *Estuaries*, 2003, 26(6): 1401 – 1415.
- [34] HAHM D, KIM G, LEE Y W, et al. Tidal influence on the sea-to-air transfer of CH₄ in the coastal ocean[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2006, 58(1): 88 – 94.
- [35] PILSON M E Q. *An Introduction to the Chemistry of the Sea*[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- [36] MARTENS C S, KIPPURUT G W, KLUMP J V. Sediment-water chemical exchange in the coastal zone traced by in situ radon-222 flux measurements[J]. *Science*, 1980, 208(4441): 285 – 288.
- [37] CORBETT D R, BURNETT W C, CABLE P H, et al. A multiple approach to the determination of Radon fluxes from sediments[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1998, 236(1): 247 – 253.
- [38] PENG T H, TAKAHASHI T, BROECKER W S. Surface Radon measurements in the North Pacific Ocean station Papa[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(12): 1772 – 1780.
- [39] ROBINSON C, LI L, BARRY D A. Effect of tidal forcing on a subterranean estuary[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 851 – 865.
- [40] LIU Yi, JIAO J J, LUO Xin. Effects of inland water level oscillation on groundwater dynamics and land-sourced solute transport in a coastal aquifer[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 114: 347 – 360.
- [41] WU Zijun, ZHU Hongni, TANG Dehao, et al. Submarine groundwater discharge as a significant export of dissolved inorganic carbon from a mangrove tidal creek to Qinglan Bay (Hainan Island, China)[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 223: 104451.
- [42] 王超群, 贾丽云, 胡道功, 等. 海口市江东新区马袅-铺前断裂第四纪活动特征 [J]. *地质学报*, 2022, 96(2): 403 – 417. [WANG Chaqun, JIA Liyun, HU Daogong, et al. Quaternary activity characteristics of the Maniao-Puqian fault in the Jiangdong New District of Haikou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 403 – 417. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 丁莹莹. 琼北铺前-清澜断裂北段晚新生代构造活动与东寨港构造沉降 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [DING Yingying. Late cenozoic tectonic activity of the northern part of Puqian-Qinglan fault and structural subsidence of Dongzhai Port in North Hainan[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 侣祥城, 陈晓, 陈法锦, 等. ²²²Rn 指示北部湾北部近海 SGD 输送的时空特征初探 [J]. *海洋学研究*, 2023, 41(2): 94 – 103. [SI Xiangcheng, CHEN Xiao, CHEN Fajin, et al. A preliminary investigation on the spatial and temporal distribution of submarine groundwater discharge in the northern Beibu Gulf as indicated by ²²²Rn activities[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2023, 41(2): 94 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 吕晓波, 李东海, 杨小波, 等. 红树林群落通过淹水时间及海水盐度的生态位分化实现物种共存 [J]. *生物多样性*, 2024, 32(3): 24 – 32. [LYU Xiaobo, LI Donghai, YANG Xiaobo, et al. The species coexisted in mangrove communities through niche differentiation of flooding time and salinity[J]. *Biodiversity Science*, 2024, 32(3): 24 – 32. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳