

文章编号:1009-2722(2018)09-0073-06

# 潮汐影响下的海岸带地下河口水交换及其生物地球化学效应

赵世彬<sup>1,2,3</sup>, 陈广泉<sup>4</sup>, 张晓影<sup>5</sup>, 高茂生<sup>6</sup>, 许博超<sup>1,2</sup>

(1 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2 海洋国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266071; 3 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 4 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 5 暨南大学地下水与地球科学研究院, 广州 510632; 6 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 自然资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071)

**摘要:**海岸带地下河口中的生物地球化学过程是一种重要的陆海相互作用驱动力, 对于海洋中的物质收支至关重要。以青岛金沙滩为典型研究区域, 借助电阻率成像、同位素示踪等技术手段对潮汐影响下的地下河口的生物地球化学特征进行刻画, 发现地下水体的电阻率、盐度、pH、镭氡同位素及营养盐含量等各种理化参数的周日变化均表现出明显的潮汐规律, 但较同步潮汐信号滞后 2~4 h。研究结果表明, 在涨落潮过程中, 海水在地下河口发生倒灌排放, 并显著地改变了含水层的生物地球化学背景场。

**关键词:**海岸带; 地下河口; 电阻率成像; 镭氡同位素; 青岛金沙滩

中图分类号: P736; P593

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2018.09010

海岸带地区处于陆、海交互区域, 受陆地、海洋及人类活动的多重影响, 是研究全球生态系统最有价值的地区之一, 同时也是研究陆地、河口和海洋耦合模式的关键区域<sup>[1]</sup>。在“海岸带陆-海相互作用(Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ)”计划中, 海岸带的范围包括从沿岸平原、河口、三角洲、浅海大陆架一直延伸到大陆边缘的地带<sup>[2]</sup>。为了区分传统意义上的地上河口(Surface Estuary), Moore<sup>[3]</sup>提出了地下河口(Subterranean Estuary, STE)的概念。地下河口是指海岸带含水层中陆源地下淡

水与海水发生混合和化学反应的区域(或地带)。Burnett等<sup>[4]</sup>在此基础上提出了海底地下水排放(Submarine Groundwater Discharge, 简称为SGD)的广义定义, 即忽略流体组成、来源以及驱动力等因素, 将陆源淡水地下水和循环海水地下水等所有通过沉积物-水界面进入近岸海域的水体统称为海底地下水。海陆源的地下水在地下河口发生混合, 强烈改变着含水层的理化特性(Eh、pH、离子活度等)<sup>[5]</sup>, 形成生物地球化学反应活跃地带。地上河口与地下河口的交互作用已经成为陆海相互作用的热点话题, 显著影响着营养盐等陆源物质的迁移转化和源汇收支<sup>[6,7]</sup>。笔者以青岛市金沙滩为典型研究区域, 在一个潮周期内, 分析地下水电阻率、盐度、pH、镭氡同位素、营养盐等地球化学参数的变化, 探讨潮汐影响下的沙质地下河口的生物地球化学特征, 这将为进一步认识海岸带的物质收支提供基础数据。

收稿日期: 2018-06-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“海底地下水排放对黄河营养盐的贡献”(41576075); 国家海洋局海域管理技术重点实验室基金“基于Ra同位素的莱州湾南岸海水入侵灾害示踪”(201503)

作者简介: 赵世彬(1994—), 男, 在读硕士, 主要从事同位素地球化学方面的研究工作. E-mail: ouc\_zshib@163.com

## 1 采样及测试方法

### 1.1 研究区域

本研究区域位于山东省青岛市黄岛区金沙滩,濒临黄海(图1)。2016年11月13日对金沙滩岸滩地下水进行连续采样观测。沿垂直岸线方向布设高密度电法电极,约40 min获取一次地下水电阻率剖面分布数据。于金沙滩高潮位线以上约2 m处,以PIEZOMETER钻设岸滩浅钻,孔深约2 m,利用蠕动泵抽取地下水样品,取样间隔为2 h,连续采样12 h(8:00—20:00),共采集7组地下水样品,用于盐度、pH、镭氡同位素、营养盐等参数的测定。采样站位及高密度电法布线如图1所示。



图1 2016年11月青岛金沙滩地下水采样点及电法电极布点示意图

Fig.1 Maps showing the location of groundwater sampling and electrical electrode distribution in Qingdao Golden Beach in November 2016

### 1.2 分析方法

#### (1) 高密度电阻率法

采用1 m等间距的温纳(Wenner)电极布设方式,沿垂直海岸线的方向一次性布设72根高密度电法电极,进行12 h(一个完整潮周期)连续测试,电法测线与浅钻的水平距离约1 m。所用高密度电阻率仪为骄鹏 GeoPen E60DN,主机通过通讯电缆、供电电缆向八频道电极转换器发出工作指令、向电极供电并接受存储测量数据<sup>[8]</sup>,测试结果采用标准平滑限定的视电阻率对数反演进行二维剖面反演。

#### (2) 常规水文参数

获取水样后,用便携式多参仪现场测定各水样的盐度、pH等。当日潮汐时刻表下载于中国海事服务网(<http://ocean.cnss.com.cn/>)。

#### (3) 镭同位素

采集2 L水样,以不超过1 L/min的流速将水样通过填有锰纤维的样品管,定量富集样品中的镭同位素。富集管前端放有白纤维,以除去水样中的悬浮颗粒物。锰纤维样品需尽快带回实验室,用去离子水清洗纤维上的盐分和颗粒物,并将含水率调至100%,以达到最佳的测试条件<sup>[9]</sup>。3种镭同位素(<sup>224</sup>Ra、<sup>223</sup>Ra和<sup>226</sup>Ra)均使用镭同步延时计数器(RaDeCC)进行测定,测试方法及注意事项请参见Moore和Arnold<sup>[10]</sup>、Waska等<sup>[11]</sup>和Peterson等<sup>[12]</sup>。

#### (4) 氡同位素

采集250 mL水样于RAD7测氡仪(DURRIDGE,美国)气体采样瓶中,借助RAD-H<sub>2</sub>O模式对水样中的<sup>222</sup>Rn比活度进行现场测定,测试方法详见Mulligan和Charette(2006)<sup>[13]</sup>。

#### (5) 营养盐

水样采集后,立即用0.45 μm醋酸纤维滤膜过滤,滤液分装于2个100 mL的聚乙烯瓶中,一份加入氯仿常温保存,用于溶解态无机硅酸盐(DSi)的测定;另一份于20℃冷冻保存,用于溶解态无机氮、磷营养盐(DIN、DIP)的测定。测试所用仪器为QUAATRO型营养盐自动分析仪(BRAN+LUEBBE,德国),测试方法详见Grasshoff等<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地下水电阻率剖面分布及其与潮汐的关系

金沙滩海域具有正规半日潮,调查期间(2016年11月13日)10点至16点为涨潮阶段,16点至22点为落潮阶段。在一个潮周期时间内,地下水样品中盐度变化范围为13.69~15.51,平均值为 $14.80 \pm 0.60$  ( $n=13$ ,图2),于11点采集的表层海水盐度为34.8,表明金沙滩地下水受低盐度陆源地下水和高盐度循环海水地下水的共同影响。涨落潮过程中淡水地下水与海水混合,引起了地下河口中水体盐度的改变。如图2所示,金沙滩地下水的盐度变化与当日海水的潮位变化存在响应,且呈现落潮、涨潮均延迟的现象。

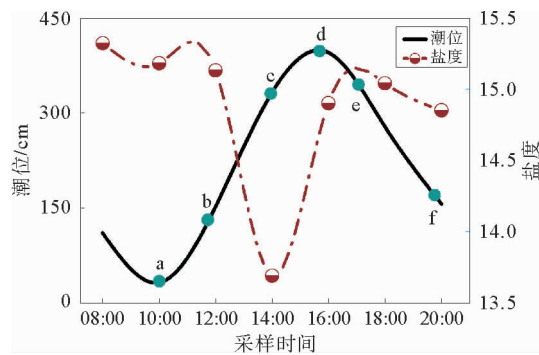


图2 一个潮周期内地下水中盐度与潮位的变化关系

Fig. 2 Changes in groundwater salinity and tidal level under a tidal cycle

不同时刻的高密度电阻率法二维反演图像如图3所示,图中横坐标数字越大表示该电极布点距海越近,蓝色的“羽状锋”地下水团表示低电阻率、高盐度的海水地下水。由图可见,海水潮汐作用对研究区域浅层地下河口的影响深度约为4米。

当海水处于最低潮时(图3a),地下含水层的高盐海水羽状锋的影响依然非常显著。在随后的涨潮阶段(10点至16点),地下水的电阻率不断升高,海水地下水的羽状锋逐渐向海一侧退去,至低潮后4小时(14点)达到最低(图3c)。在随后的退潮过程中,地下水的电阻率又逐渐降低,海水地下水的羽状锋又逐渐向陆一侧发育,在海水最高潮后2小时达到最大(图3e)。这表明海水的

涨落对地下河口的水体交换具有显著影响。涨潮时,大量海水涌到近岸并灌入地下含水层中,导致地下水的盐度升高、电阻率降低;退潮时,高盐海水退去,地下河口受低盐、高电阻率的陆源地下水影响更加明显。然而,由于地下水在含水层中的运动极为缓慢,地下河口的潮汐信号较地上河口有不同程度的延迟现象。在金沙滩的地下河口表现为涨潮延迟4h,退潮延迟2h。

### 2.2 镭同位素及其受潮汐的影响

3种镭同位素与盐度变化关系如图4所示。 $^{224}\text{Ra}$ 活度变化范围为1324~1489 dpm/100L,平均值为 $1419 \pm 76$  dpm/100 L ( $n=6$ ); $^{223}\text{Ra}$ 活度变化范围为14.4~27.64 dpm/100L,平均值为 $23.1 \pm 5.0$  dpm/100 L ( $n=6$ ); $^{226}\text{Ra}$ 活度变化范围为16.8~27.3 dpm/100 L,平均值为 $20.9 \pm 4.0$  dpm/100 L ( $n=6$ )。 $^{224}\text{Ra}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ 和 $^{226}\text{Ra}$ 的半衰期分别为3.66 d、11.2 d和1600 a,因此在12h的潮周期内,由衰变导致的镭同位素减少量可以忽略,而低镭海水的倒灌稀释与地下水对含水层颗粒物的解吸可能成为改变地下水镭同位素浓度的主要因素。 $^{224}\text{Ra}$ 在地下水含量较高,在一个潮周期内其活度变化与盐度的变化具有同步性(图4a),说明其浓度极有可能受控于高盐度的地下水对含水层颗粒物上镭的解吸作用。 $^{223}\text{Ra}$ 的变化与盐度变化不同步,涨潮阶段甚至表现为相反的变化趋势(图4b);而 $^{226}\text{Ra}$ 与盐度的反相变化规律更为明显(图4c)。3种镭同位素的浓度在潮汐尺度下的变化规律不同,这表明地下河口中多元化的影响因素对镭同位素地化行为影响极为复杂,如核素再生速率、母体核素浓度、解吸与稀释过程的竞争关系等。 $^{222}\text{Rn}$ 活度变化范围为10~186 dpm/L,平均值为 $(104 \pm 82)$  dpm/L ( $n=6$ ),其半衰期为3.83 d。 $^{222}\text{Rn}$ 与各种镭同位素的行为不同,呈现出更为明显的潮汐特征,在涨落潮不同阶段与盐度变化几乎同步(图4d)。

### 2.3 营养盐的变化及其受潮汐的影响

一个潮周期内, $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度变化范围为0.01~0.09  $\mu\text{mol/L}$ ,平均值为0.04  $\mu\text{mol/L}$  ( $n=6$ ); $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度变化范围为0.76~1.10  $\mu\text{mol/L}$ ,平均值为0.81  $\mu\text{mol/L}$  ( $n=6$ ); $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化范

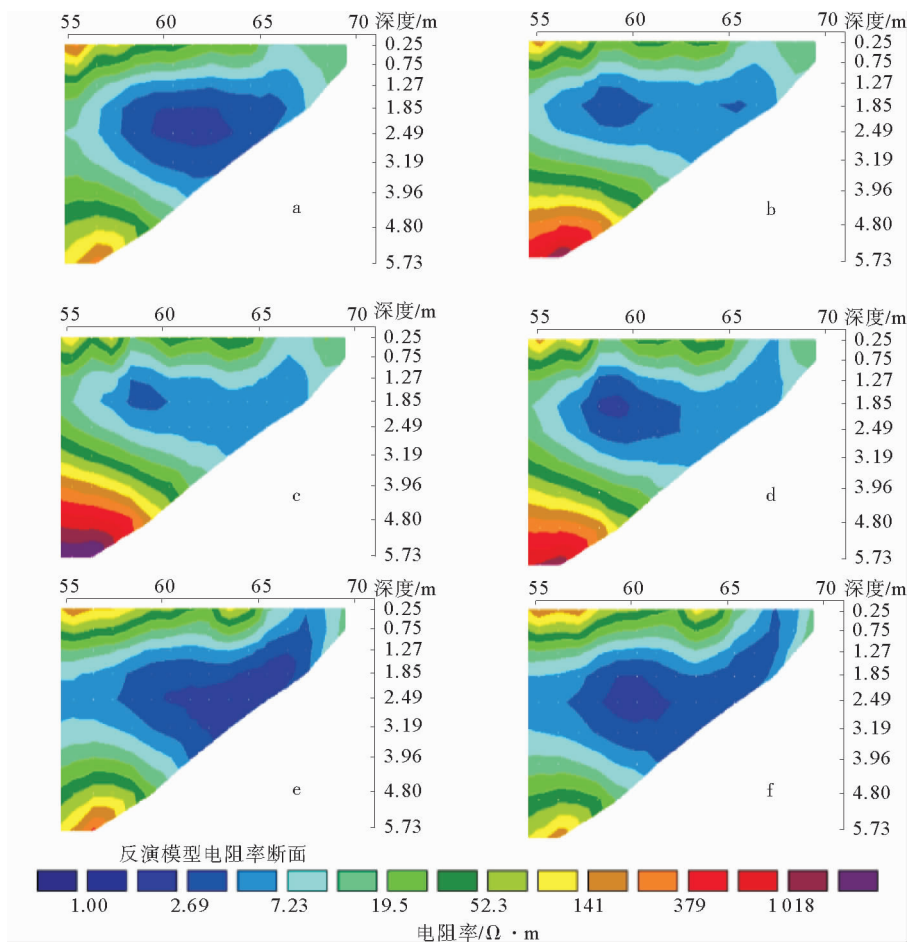


图3 高密度电阻率法在不同潮汐时刻的二维反演图像

Fig. 3 2D inversion images by high density resistivity imaging method at different tidal moments

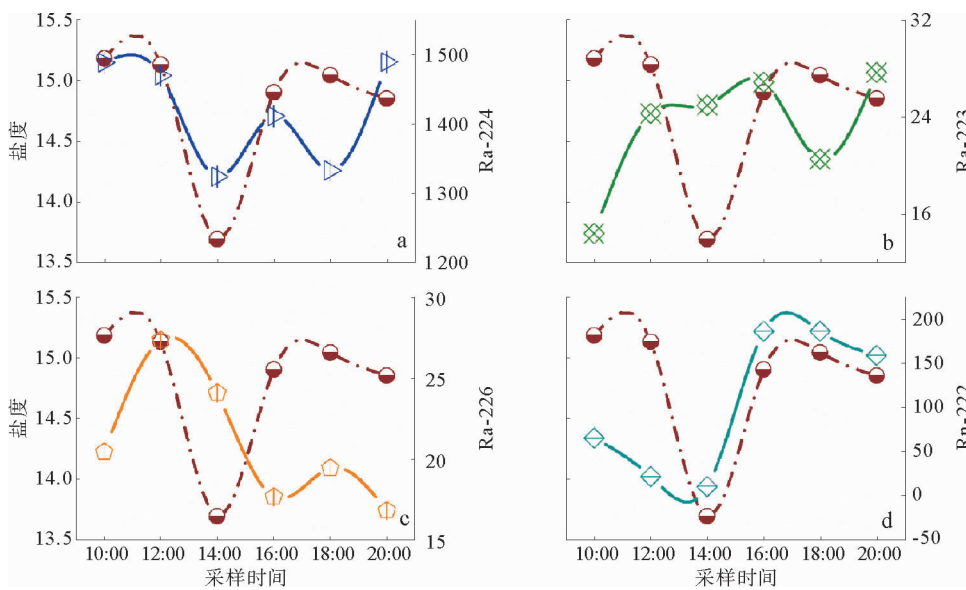


图4  $^{224}\text{Ra}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和  $^{222}\text{Rn}$  比活度与盐度的变化关系

Fig. 4 Changes in  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , and  $^{222}\text{Rn}$  activities and their relations to groundwater salinity



围为 89~195  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 134  $\mu\text{mol/L}$  ( $n=6$ ); DSi 浓度变化范围为 43.9~45.0  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 44.4  $\mu\text{mol/L}$  ( $n=6$ ); DIP 浓度变化范围为 0.64~1.08  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 0.86  $\mu\text{mol/L}$  ( $n=6$ )。

该处地下水样品中  $\text{NO}_3\text{-N}$  为 DIN 的主要存在形态, 占 DIN 的 99% 以上, 还原态氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 含量极低。由于采样位置位于海滩高潮潮位线以上, 深度仅有 2 m, 受潮汐作用影响显著; 相对富氧的海水频繁侵入地下含水层, 使得该处浅层地下水处于相对氧化的环境。这也是海岸带含水层中物质快速运输和能量混合现象存在的证据<sup>[6]</sup>。

镭同位素与营养盐的变化关系如图 5 所示。一个潮周期内,  $\text{NO}_3\text{-N}$  及 DIN 的变化与  $^{224}\text{Ra}$  行为一致(图 5a), DSi 的变化与  $^{222}\text{Rn}$  行为一致(图 5b),  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  及 DIP 的变化与  $^{226}\text{Ra}$  的变化较为一致(图 5c)。

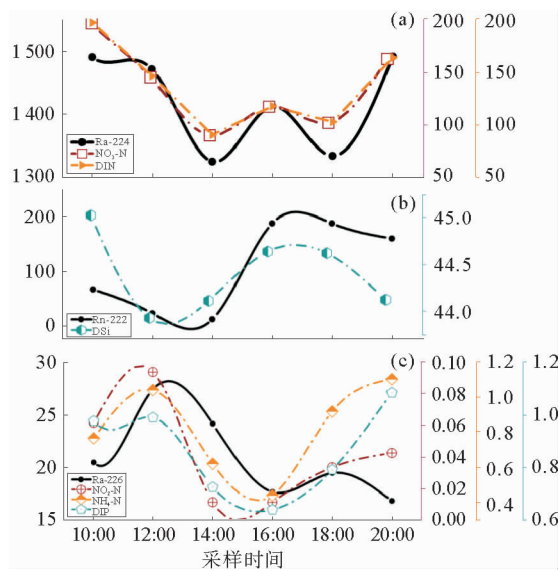


图 5 镭同位素与各营养盐的变化关系

Fig. 5 Changes in different radium/radon isotopes and nutrients in groundwater

于 11 点采集的表层海水样品的各项营养盐浓度均显著低于地下水, 后者样品中 DIN、DIP 和 DSi 的平均浓度分别约为前者的 12 倍、4 倍和 2 倍。表层海水样品中 N/P、Si/N 和 Si/P 比值分别为 61、2.3 和 137, 均明显偏离 Redfield 比值。

地下水中 N/P、Si/N 和 Si/P 平均比值分别为 161、0.33 和 52, 在地下河口经历改造后的地下水输入到近海海域, 将显著地影响海水中营养盐的含量及组成, 进而对海域的生态环境健康程度产生影响。

### 3 结论

借助电阻率成像、同位素示踪等技术手段对潮汐影响下的地下河口生物地球化学特征进行刻画, 得到如下结论:

(1) 高密度电阻率成像法能够有效刻画海岸带地下含水层的水体交换过程, 金沙滩地下河口的潮汐信号较海水的涨落有 2~4 h 的延迟。

(2) 地下水中镭同位素的浓度变化表现出不同趋势, 其中短半衰期镭、氡同位素的变化特征与盐度的变化呈现较好一致性, 而长半衰期的镭同位素与盐度变化更为复杂。

(3) 地下水中各种营养盐的含量及组成均与其在海水中的特征显著不同, 其向海排放将对近海生态系统产生重要影响。

#### 参考文献:

- [1] 彭晓彤, 周怀阳. 海岸带营养盐生物地球化学研究评述[J]. 海洋通报, 2002, 21(3): 69-77.
- [2] Zone L O II, Kremer H H, Tissier M D A L, et al. Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone: Science Plan and Implementation Strategy[J]. Environmental Policy Collection, 2005, 20(11): 1262-1268.
- [3] Moore W S. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water[J]. Marine Chemistry, 1999, 65(1/2): 111-125.
- [4] Burnett W C, Bokuniewicz H, Huettel M, et al. Groundwater and Pore Water Inputs to the Coastal Zone[J]. Biogeochemistry, 2003, 66(1/2): 3-33.
- [5] Smith C G, Cable J E, Martin J B, et al. Evaluating the source and seasonality of submarine groundwater discharge using a radon-222 pore water transport model[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2008, 273(3/4): 312-322.
- [6] Swarzenski P W, Burnett W C, Greenwood W J, et al. Combined time-series resistivity and geochemical tracer techniques to examine submarine groundwater discharge at Dor Beach, Israel[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(24): L24405.
- [7] 沈焕庭, 朱建荣. 论我国海岸带陆海相互作用研究[J]. 海

- 洋通报, 1999, 18(6): 11-17.
- [8] 苏永军, 范 剑, 刘宏伟, 等. 高密度电阻率法探测海水入侵咸淡水界限初步调查研究——以莱州湾为例[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(3): 177-181.
- [9] Sun Y, Torgersen T. The effects of water content and Mn-fiber surface conditions on  $^{224}\text{Ra}$  measurement by  $^{220}\text{Rn}$  emanation [J]. *Marine Chemistry*, 1998, 62(3/4): 299-306.
- [10] Moore W S, Arnold R. Measurement of  $^{223}\text{Ra}$  and  $^{224}\text{Ra}$  in coastal waters using a delayed coincidence counter [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1996, 101(C1): 1321-1329.
- [11] Waska H, Kim S, Kim G, et al. An efficient and simple method for measuring  $^{226}\text{Ra}$  using the scintillation cell in a delayed coincidence counting system (RaDeCC) [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99(12): 1859-1862.
- [12] Peterson R N, Burnett W C, Dimova N, et al. Comparison of measurement methods for radium-226 on manganese-fiber [J]. *Limnology & Oceanography Methods*, 2009, 7(2): 196-205.
- [13] Mulligan A E, Charette M A. Intercomparison of submarine groundwater discharge estimates from a sandy unconfined aquifer [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(3/4): 411-425.
- [14] Grasshoff K, Almgreen T. *Methods of seawater analysis* [M]. Weinheim, New York: Wiley-Vch, 1976.

## WATER EXCHANGE AND BIOGEOCHEMICAL EFFECTS OF SUBTERRANEAN ESTUARY WITH TIDE

ZHAO Shibin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Guangquan<sup>4</sup>, ZHANG Xiaoying<sup>5</sup>, GAO Maosheng<sup>6</sup>, XU Bochao<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3 College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4 The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 5 Institute of Groundwater and Earth Science, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 6 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The biogeochemical process in the subterranean estuary of a coastal zone is an important driving force to the interaction between land and sea, which is critical for the research of material budget. In this study, the Qingdao Golden Beach was chosen as a typical case for research. Using resistivity imaging and isotopic tracing technology as means, we tried to understand the biogeochemical changes of the subterranean estuary on a tidal scale. It is found that in a typical tidal cycle, various physical and chemical parameters of groundwater, such as resistivity, salinity, pH, radium/radon isotopes and nutrients, are all significantly influenced by the changing tide. Tidal signals in the subterranean estuary are usually delayed for about 2-4 hours. In the cycle of flood and ebb tides, seawater will be recharged into and discharged out of the subterranean estuary, and thus the biogeochemical background of the aquifer will be significantly changed.

**Key words:** coastal zone; subterranean estuary; resistivity imaging; radium/radon isotopes; Qingdao Golden Beach