

基岩海岛地下水与海水相互作用研究

张康, 韩冬梅, 曹天正, 宋献方, 王威, 曹艳玲

Interaction between groundwater and seawater in bedrock islands

ZHANG Kang, HAN Dongmei, CAO Tianzheng, SONG Xianfang, WANG Wei, and CAO Yanling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

同位素技术解析安阳河与地下水相互作用

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31-39

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

海水入侵模拟方法VFT3D及应用

Development and application of sea water intrusion models

王佳琪, 郭芷琳, 田勇, 范林峰, 曾文科, 王晓丽, 苏, MicheleLancia, 郑春苗 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 184-194

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 罗剑 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 1-7

基于高斯过程回归的地下水模型结构不确定性分析与控制

Quantification and reduction of groundwater model structural uncertainty based on Gaussian process regression

钟乐乐, 曾献奎, 吴吉春 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 1-1

地下水氮循环与砷迁移转化耦合的研究现状和趋势

Research status and trend of coupling between nitrogen cycle and arsenic migration and transformation in groundwater systems

郭华明, 高志鹏, 修伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 153-163



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112011

张康, 韩冬梅, 曹天正, 等. 基岩海岛地下水与海水相互作用研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 3-12.
ZHANG Kang, HAN Dongmei, CAO Tianzheng, *et al.* Interaction between groundwater and seawater in bedrock islands[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 3-12.

基岩海岛地下水与海水相互作用研究

张康^{1,2}, 韩冬梅^{1,2}, 曹天正^{1,2,3}, 宋献方^{1,2}, 王威⁴, 曹艳玲⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院大学中丹学院, 北京 101400; 4. 山东省第一地质矿产勘查院山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 山东 济南 250109)

摘要: 中国北方基岩海岛水文地质条件独特, 气候变化和人类活动不同程度地影响着海岛地下水与海水相互作用过程, 然而对包括海水入侵(SWI)和海底地下水排泄(SGD)的水文过程的定量认识比较缺乏。本研究基于 2012—2016 年我国北方某基岩群岛降水、地下水水位、水质动态监测数据, 运用数理统计、空间插值和水力学方法, 分析了基岩海岛地下水与海水相互作用的特征和影响因素。结果表明, 降水和开采是影响地下水、海水相互作用的主要因素, 地下水水位变化滞后于降水事件约 10 d; 南岛东北岸、南岸的大部分地区没有发生海水入侵, 地下水向海排泄过程较稳定, 2012—2016 年 SGD 速率均值为 0.2 m/d, 向海 NO₃-N 通量均值为 81.8 mmol/(m²·d); 北岛东南地区是海水入侵的严重区域, 地下水水位长期低于海平面且逐年下降, 2012—2016 年 SWI 速率均值为 0.3 m/d, 向陆 NO₃-N 通量均值为 69.6 mmol/(m²·d)。分别计算南、北两岛枯水季(2014 年 4 月)、丰水季(2013 年 9 月)SGD 水量, 北岛 SGD 水量为 3.5×10⁴ ~ 4.5×10⁴ m³/d, 南岛 SGD 水量为 0.4×10⁴ ~ 1.1×10⁴ m³/d。相关结果可为基岩海岛地下水资源管理和生态环境保护提供重要参考。

关键词: 基岩海岛; 海水入侵; 地下水向海排泄; 地下水-海水相互作用

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0003-10

Interaction between groundwater and seawater in bedrock islands

ZHANG Kang^{1,2}, HAN Dongmei^{1,2}, CAO Tianzheng^{1,2,3}, SONG Xianfang^{1,2}, WANG Wei⁴, CAO Yanling⁴

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China; 4. No.1 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong Engineering Laboratory for High-grade Iron Ore Exploration and Exploitation, Jinan, Shandong 250109, China)

Abstract: The hydrogeological settings of bedrock islands in northern China are unique. Climate change and human activities can affect the interaction between groundwater and seawater around the islands to varying degrees, but there is a lack of quantitative understanding of such hydrological processes, including seawater intrusion (SWI) and submarine groundwater discharge (SGD). In this study, we analyzed the precipitation,

收稿日期: 2021-12-05; 修订日期: 2022-02-14

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 山东省第一地质矿产勘查院开放基金项目(2022DY05); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200502)

第一作者: 张康(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水水文过程研究。E-mail: zhangk.20s@igsnr.ac.cn

通讯作者: 韩冬梅(1978-), 女, 博士, 研究员, 主要从事滨海水循环与水安全研究。E-mail: handm@igsnr.ac.cn

groundwater levels, and water quality data (2012-2016) for identifying the characteristics and controlling factors of the interaction between groundwater and seawater in bedrock islands by using mathematical statistics, spatial interpolation, and hydraulics methods. The results show that precipitation and groundwater pumping are the main factors affecting the groundwater-seawater interaction. The variations of groundwater levels lag behind the rainfall events by about 10 days. There occurred no SWI in most areas on the northeastern and southern coasts of the South Island, with relative stable marine groundwater discharge. The average SGD velocity was 0.2 m/d, and the average $\text{NO}_3\text{-N}$ flux to the sea was $81.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. The southeast area of the North Island has been seriously threatened by SWI, and the groundwater levels have been below sea level for a long time and falling year by year. The average SWI rate is 0.3 m/d, and the average $\text{NO}_3\text{-N}$ flux towards the land is $69.6 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. The SGD rates of the South and North Islands were estimated for dry season (April 2014) and wet season (September 2013), respectively. It was $3.5\times 10^4\text{--}4.5\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ for the North Island, and $0.4\times 10^4\text{--}1.1\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ for the South Island. The results can provide important reference for coastal groundwater resource management and ecological environment protection in bedrock islands.

Keywords: bedrock island; seawater Intrusion (SWI); Submarine Groundwater Discharge (SGD); interaction between groundwater and seawater

地下水与海水的相互作用主要包括海水入侵 (Seawater Intrusion, SWI) 和海底地下水排泄^[1] (Submarine Groundwater Discharge, SGD) 2 个同时存在且互补的地下水文过程^[2-3]。不合理的地下水开采引发的 SWI 已对全球诸多含水层的地下水资源构成严重威胁^[4-10]。SGD 营养盐通量可显著影响海岸带营养盐收支和生物地球化学循环, 过量营养盐排泄可能引起沿海富营养化^[11-14]。科学管理海岛地下水资源, 查明地下水-海水相互作用模式和程度, 已成为亟需解决的重要问题。

近年来针对基岩海岛地下水与海水相互作用的研究有了长足的进步。山东长岛之北长山岛中部和北部低地均有 SWI 发生, 入侵范围占全岛面积的 17%~19%^[15]。庞忠和等^[16]利用氢氧同位素证明长岛的基岩裂隙水起源于大气降水, 受到海水影响地下水 Cl 浓度高于内陆地区。国际上对 SWI 的研究主要集中在松散沉积物中的含水层, 但在人口密集的大型基岩群岛也曾报道过 SWI 造成钻孔报废的情况^[17]。近年来, 有的研究者建立了用于估算渤海湾、莱州湾、大亚湾和胶州湾 SGD 通量的镭 (Ra) 和氡 (Rn) 同位素质量平衡模型^[12,18-19]。汪迁迁^[20]利用镭氡同位素证明 SGD 输入是渤海湾水体营养盐的主要来源。Ma 等^[21]利用达西定律估计了在海潮作用下莱州湾东岸淤泥质海滩的 SGD。然而, 以往的 SWI 与 SGD 研究大多是针对河口、潮滩、海湾和大陆架的临近海域^[22-26], 很少有关于基岩海岛的相关研究。作为中国北方地区典型的基岩群岛, 该岛在地下水与海水的相互作用方面一直以来缺乏系统性的定量认识。鉴于

此, 本文分析了该岛地下水位及水质的变化, 探讨了基岩海岛地下水与海水相互作用的特征和影响因素, 进行了 SWI 和 SGD 的研究, 运用插值方法识别了海水入侵严重区域, 基于达西定律估算了水分交换速率、水量和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量。研究可为海岛地下水资源科学管理, 保护和修复海岛水生态环境提供科学参考。

1 研究区概况

该基岩群岛位于胶东、辽东半岛之间, 黄渤海交汇处, 有居民岛 10 个, 最大岛面积 12.8 km^2 。该岛的气候类型属于亚洲东部季风区大陆性气候, 因受冷暖空气交替影响, 加之四周海水的调温作用, 四季温度呈现滞后性, 春季多风升温晚、夏季多雨气候凉、秋季干燥降温慢、冬季风频寒潮多。年平均气温为 $11.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 年平均降水量为 560 mm , 地下水全部为大气降水补给。

岛上的基岩主要是由石英岩、板岩和千枚岩组成, 长期风化剥蚀作用使得岩石破碎, 丘陵顶部比较平缓。岛上出露地层主要为第四系松散岩类和蓬莱群变质岩, 地下水类型主要有松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。第四系沉积物厚度为 $6\sim 15 \text{ m}$, 孔隙水埋深一般在 $3\sim 10 \text{ m}$, 含水层富水性较差, 单井涌水量多在 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下; 构造裂隙的发育深度一般小于 100 m , 地下水埋深在 $10\sim 35 \text{ m}$ 之间, 含水层富水性较强, 单井涌水量一般在 $100\sim 250 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[27-29]。低洼谷地在由陆变岛的过程中曾被海水浸没, 谷地中有海相沉积, 且局部低洼谷地有海相沉积层分布。

20 世纪 80 年代, 由于地下水资源的不合理开采,

该岛部分水井的地下水 TDS 明显升高^[16]。地下水资源均衡的破坏和开采强度的空间不均加速了海水入侵的进程。有资料显示^[16],大多数临岸大口径井受咸水入侵影响已废弃。过量开采改变了地下水的水动力条件,咸淡水之间形成向陆方向的水力梯度,地下水天然平衡状态被破坏,最终导致海水入侵灾害发生^[15]。为了修复地下水环境,2019年7月份通过的《海洋生态保护条例》^[30]第二十条规定,“在城市公共供水管网覆盖区域内,禁止取用地下水”,自此该岛进入禁采时代,岛上居民用水改用自来水、跨海工程引水和海水/苦咸水淡化水。但因为岛上苦咸水淡化工程仍旧是抽取已咸化的地下水,所以对地下水的取用仍然存在。

2 数据资料与研究方法

2.1 地下水观测井位置

为了解研究区的地下水动态特征,本文选取了南岛的7个井和北岛的3个井进行地下水观测(W1—W10)。从2012年1月—2015年2月、2016年1—12月,每隔5d观测1次水位,每口井有300个水位数据,共计3000个。观测井位置如图1所示,通过地图测算得出各观测井离最近海岸的距离(表1)。降水量数据来自该岛气象局提供的逐月降水量资料。

根据地形图、地下水观测井所在的岩性分布、地

质剖面资料^[31-32],及地水水位监测数据,绘制了典型区域水文地质剖面图(图2)。该岛出露的地层岩性较简单,主要为元古界石英岩,厚度大于2000m,上覆薄层第四系松散沉积物,厚度约6~15m。

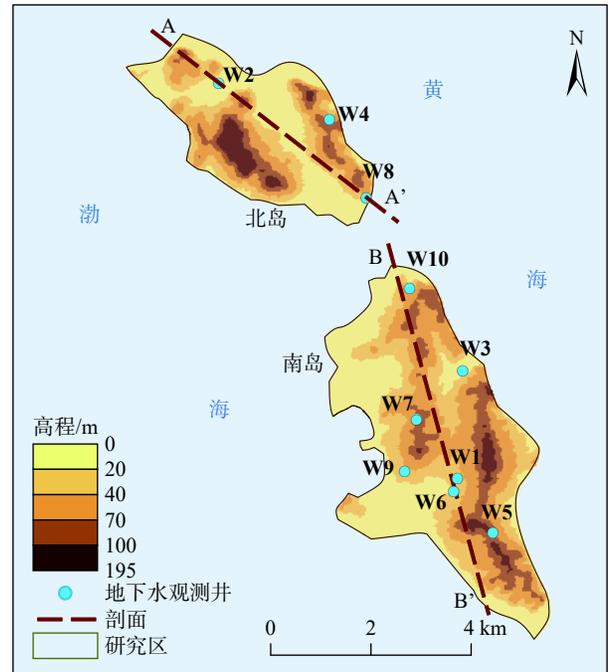


图1 研究区地下水观测井位置图

Fig. 1 Location map of groundwater observation wells in study area

表1 观测井离最近海岸的距离及水井基本情况

Table 1 The distance of the observation wells from the nearest shore and the informations of the observation wells

观测井编号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10
离近岸的距离/m	760	704	698	643	598	495	431	308	250	200
地面高程/m	18.6	6.7	25.9	17.5	25.3	17.1	5.1	15.4	3.1	24.4
井深/m	100	13	110	100	98	75	6.3	102	5	100
多年平均地下水水位/m	-11.5	4.3	3.8	6.3	3.1	-7.4	4.9	-4.1	2.0	5.4
地下水埋深/m	30.1	2.4	22.1	11.3	22.3	24.5	0.1	19.5	1.1	19.0

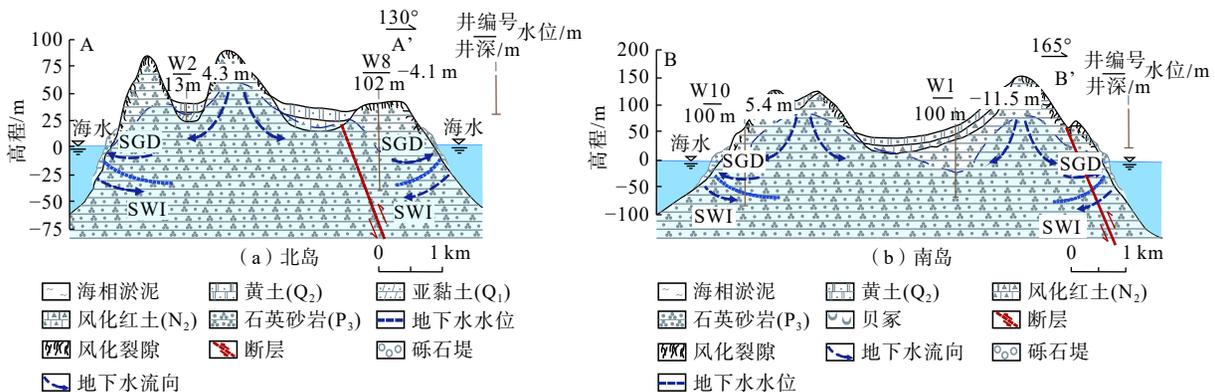


图2 北岛(A-A')和南岛(B-B')水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeologic cross-section of the North Island (A-A') and South Island (B-B')

2.2 水分交换速率的计算

基岩裂隙含水层渗透系数为 10~30 m/d^[33];分布在缓坡地段的残积-坡积物较为致密,透水性较差,含水层厚度 2~5 m,渗透系数为 5~10 m/d;分布在滨海地区的海积物较为松散,透水性较好,渗透系数为 10~20 m/d^[34]。根据观测井的地面高程、井深和年平均水位数据,计算得 W2、W7、W9 地下水埋深小于 2 m,认为其地下水来源于上部松散岩土含水层,渗透系数为 5~10 m/d;其余 7 口井地下水埋深 11~35 m,认为其地下水来源于下部基岩裂隙含水层,渗透系数为 10~30 m/d。

利用野外观测的地下水水位数据,基于达西定律可以计算出每口井垂直海岸线方向的水力梯度,定量计算地下水与海水的水分交换速率^[35-36]。计算中取多年平均水位计算平均水力梯度,取月平均最高和最低水位计算最大和最小水力梯度,结合水文地质条件确定渗透路径。根据地下水中 NO₃-N 的浓度,可进一步估算出地下水向海排泄的 NO₃-N 通量。

2.3 地统计插值方法

基于协同克里金(Cokriging)插值方法,可以将 DEM 数据作为协变量,对 2013 年 1 月地下水水位实测数据进行插值,并根据水库、沟渠等的分布对插值结果进行核实,以提高水位插值的准确性。

将各观测井的 SGD 速率在海岸线上进行 IDW 插值^[37],再对海岸线上的 SGD 速率求和,可以计算出 SGD 水量。

2.4 海水入侵程度的划分

收集了 2018 年 5 月 26 眼监测井的水化学分析结果,由山东省地质环境监测总站实验室测试分析得到。根据《海水入侵监测与评价技术规程》^[38],采用 Cl⁻质量浓度 250 mg/L 指示 SWI, Cl⁻质量浓度大于 250 mg/L 则证明发生了海水入侵,海水入侵程度等级划分见表 2。

表 2 海水入侵的现状评价等级划分^[38]

分级指标	I	II	III
氯离子质量浓度/(mg·L ⁻¹)	<250	250~1 000	>1 000
入侵程度	无入侵	轻度入侵	严重入侵

3 结果

3.1 地下水水位分布特征

地下水水位和降水量的变化见图 3。整体来看,地下水水位波动较小的井分布在南岛的 W5、W7 和 W9,北岛的 W2 和 W4。其中,南岛的 W7 和 W9 地下水水位最为稳定,W7 地下水水位一直维持在 5 m 左右,W9 维持在 2 m 左右。

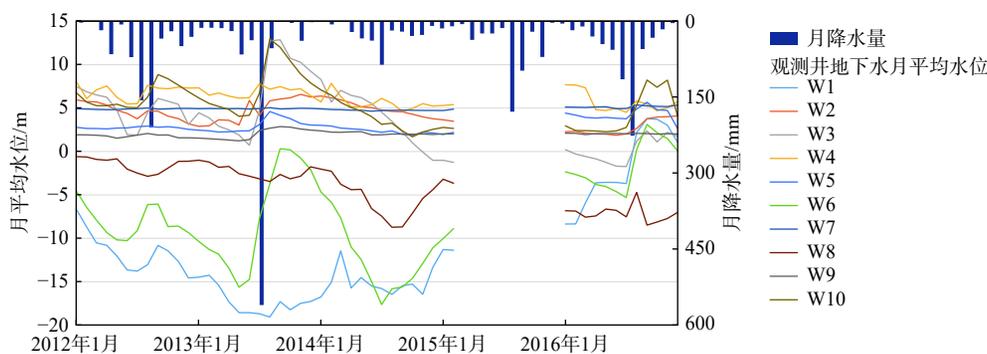


图 3 2012—2016 年地下水水位与降水量变化

Fig. 3 Variations of groundwater levels and precipitation from 2012 to 2016

地下水水位波动较大的井主要在南岛的 W1、W6 和北岛的 W8。这 3 个水位监测点的水位不仅波动很大,而且常年低于海平面。从图 1 可以看出,W1、W6 距离较近,都是在海拔低、地形平缓的城镇集中建设区域,即使距离海岸较远,仍然有很大的海水入侵风险。

在降水丰富的 7、8 月份,W7 地下水平均埋深与地表面十分接近,地下水水位较高且保持稳定,水位

保持在 5 m 左右。说明当地的地下水受人为干扰和大气降水的影响很小,地下水存在稳定的补给来源。

研究区降水量的年度、年内变化很大,2013 年 7 月份降水量达 560.4 mm,而同年 9 月份降水量仅 0.1 mm。降水大多集中在每年的 7—8 月份,地下水水位和大气降水都呈现出明显的季节性特征:夏季降水充足,地下水水位较高;冬春季降水稀少,地下水水位低。2013 年夏季的集中降水大幅度提高了南岛的 W3、

W6 和 W10 的地下水水位, 特别是 W6 对降水量增加的正向响应特别明显。

在 2012、2013、2016 年的 7—8 月份的 3 次集中降水事件后, 大部分监测井水位波动存在滞后, 波峰出现在降水峰值之后 10 d 左右。其中, 南岛的 W1、W6

滞后时间较短, 对降水的响应十分敏感; W3、W10 滞后时间较长。

3.2 水分交换速率和 SGD 水量的定量估算

本研究计算了 10 个地下水观测井水分交换速率及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量, 见表 3。

表 3 地下水观测井的 SWI 和 SGD 计算结果

Table 3 SWI and SGD calculation results of groundwater observation wells

地下水观测井编号	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	多年平均水位和海平面的水位差/m	井距离海岸的垂直距离/m	地下水和海水的交换速率/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	$\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	时间	$\text{NO}_3\text{-N}$ 通量/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
W1	20	-11.4	760	-0.3	26.3	2016-10-26	-562.58
					28	2018-05-02	-598.95
W2	5	4.3	704	0.03	40	2015-06-22	86.24
					36	2018-05-17	77.62
W3	20	3.7	698	0.11	1.2	2016-10-26	8.69
					21	2018-05-02	158.6
W4	20	6.2	643	0.19	5.2	2015-06-22	72.39
					3	2018-05-17	41.52
W5	20	3.1	598	0.1	-	-	-
					21.8	2015-06-24	-460.54
W6	20	-7.3	495	-0.3	26.8	2016-10-26	-566.16
					19	2018-05-02	-401.39
W7	5	4.9	431	0.06	-	-	-
W8	20	-4.1	308	-0.27	4.3	2015-06-22	-81.8
					3	2018-05-17	-57.47
W9	5	2	250	0.04	-	-	-
W10	20	5.4	200	0.54	1.4	2016-10-26	55.44
					4	2018-05-02	154

注: 多年平均水位和海平面的水位差、井距离海岸的垂直距离、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度数据来源于该岛自然资源局。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量速率为正表示地下水排泄, 速率为负表示海水入侵。

从表 3 的计算结果中, 可以大体判断出南、北岛的 SGD 和 SWI 主导区域。南岛东北岸、南岸的大部分地区没有发生海水入侵, 地下水向海排泄过程较稳定, 2012—2016 年 SGD 速率均值为 0.2 m/d, 向海 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量均值为 81.8 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。北岛东南地区是海水入侵的严重区域, 地下水水位长期低于海平面且逐年下降, 2012—2016 年 SWI 速率均值为 0.3 m/d, 向陆 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量均值为 69.6 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

通过 ArcGIS 的反距离权重法插值工具对南、北岛枯水季(2014 年 4 月)、丰水季(2013 年 9 月)和月平均 SGD 水量分别计算, 北岛 SGD 水量为 $3.5\times 10^4 \sim 4.5\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 南岛 SGD 水量为 $0.4\times 10^4 \sim 1.1\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。基于 2012—2016 年监测井的月平均 SGD 速率进行插值, 北岛 SGD 水量平均值为 $2.7\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 南岛 SGD 水量平均值为 $0.8\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.3 地下水水位分布、Cl 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分布

2013 年 1 月份地下水水位等值线分布图(图 4)显示, 地下水水位负值区主要分布在北岛南岸和南岛西

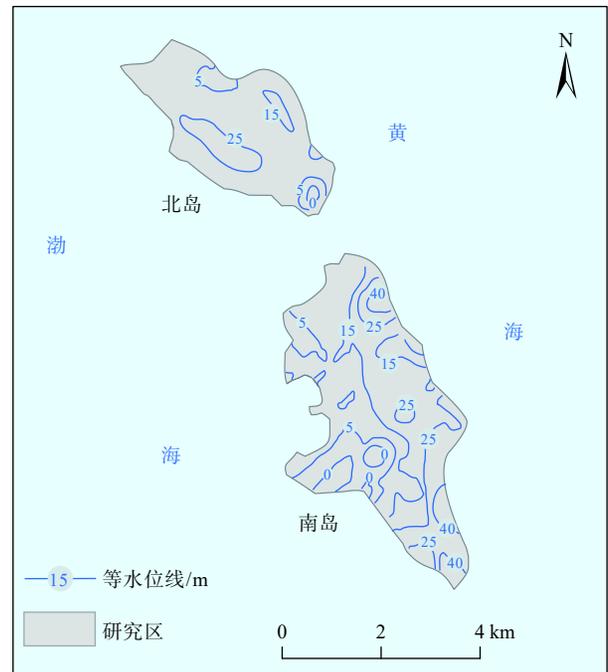


图 4 2013 年 1 月地下水水位等值线分布图

Fig. 4 Distribution of groundwater-table contour in January 2013

岸,高值区主要分布在南岛东北岸和南岸。北岛地下水主要流向为由北向南,南岛地下水主要流向为由东向西。

2018年5月地下水中Cl⁻和NO₃-N质量浓度分布见图5。Cl⁻质量浓度较高的区域和地下水水位低的区域基本重合,南岛南岸的大部分地区和东北岸局部地

区没有发生海水入侵,海水入侵从西南岸和西岸(港口以南约1.5 km处)向岛内发展,入侵程度为轻度,Cl⁻质量浓度250~1 000 mg/L;北岛东南岸海水入侵程度为严重入侵,Cl⁻质量浓度大于1 000 mg/L。

NO₃-N浓度高值区位于南岛中部及北岛北部区域。

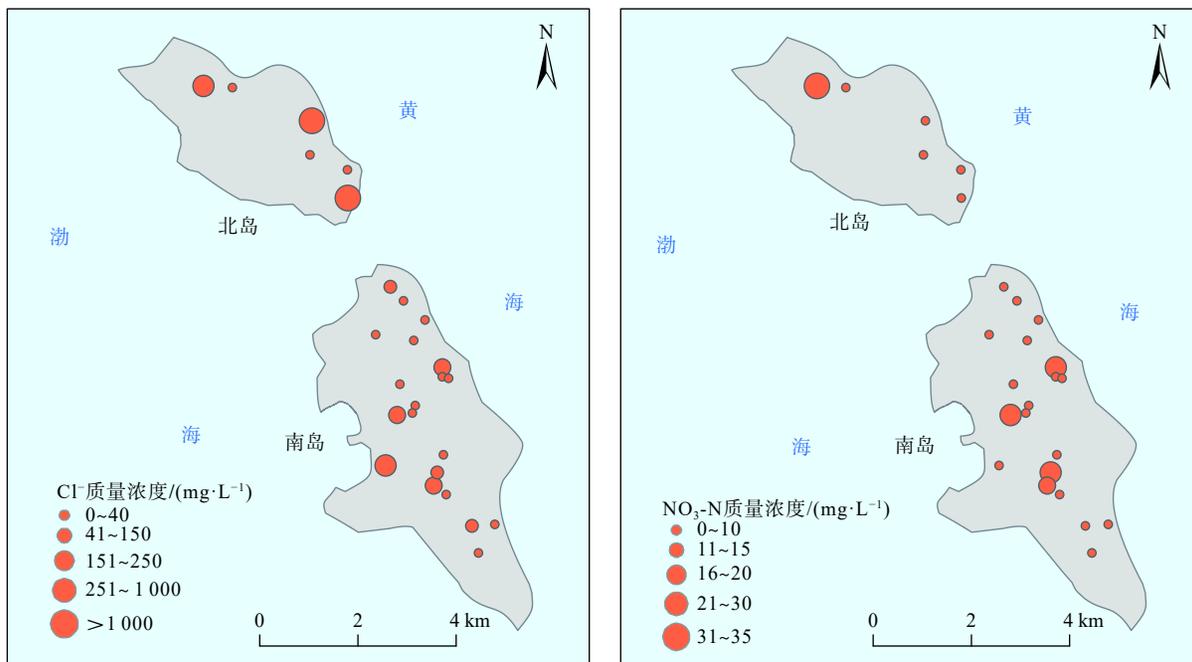


图 5 研究区地下水 Cl⁻ 和 NO₃-N 质量浓度分布图

Fig. 5 Distribution of groundwater Cl⁻ and NO₃-N concentrations in study area

3.4 水化学组成

地下水样的 pH 值介于 7.0~8.5 之间(表 4),整体呈弱碱性,变异系数小。TDS 介于 25.5~6 979.0 mg/L 之间,平均值为 1 093.5 mg/L,按照 TDS 进行分类^[39],大部分地下水是淡水(<1 g/L)和微咸水(1~3 g/L),只有北岛的 W4、W8 的地下水是咸水(3~10 g/L)。有将

近一半的地下水水样菌落总数远远大于 1 000 CFU/mL,属 V 类地下水^[40]。菌落总数过高表明原生地下水环境可能存在污染,不宜作为生活饮用水水源。除 pH 以外,其余各水化学参数的变异系数均超过了 0.15,氯化物和总硬度(以 CaCO₃ 计)均存在极端超标值。

表 4 地下水水样的水化学特征统计

Table 4 Statistics on hydrochemical characteristics of groundwater samples

	pH	TDS (/mg·L ⁻¹)	总硬度(以CaCO ₃ 计) (/mg·L ⁻¹)	菌落总数 (/CFU·mL ⁻¹)	质量浓度(/(mg·L ⁻¹))				
					氯化物	硫酸盐	NO ₃ -N	Fe	Mn
最大值	8.5	6979.0	901.0	210000.0	2730.0	291.0	40.0	0.31	0.09
最小值	7.0	25.5	15.0	ND	9.0	7.1	1.2	0.04	0.01
平均值	7.4	1093.5	411.0	10724.0	420.6	76.4	15.2	0.10	0.00
标准差	0.4	1325.0	210.0	38769.5	628.5	59.2	12.9	0.10	0.00
变异系数	0.1	1.2	0.5	3.6	1.5	0.8	0.8	0.60	1.00

注: ND表示未检出。

4 讨论

4.1 SWI 和 SGD 的特征分析

海底地下水排泄(SGD)由 2 部分组成,一是来自

内陆的地下水,另一个是海水循环量(又叫“再循环海水”),即海水在潮汐、波浪等各种因素作用下通过海-陆界面进入近海含水层后又流回到海洋的水^[1]。SGD 受陆地和海洋驱动力的双重作用,因为“再循环海

水”只发生在近岸含水层和海底沉积物的小范围内^[41],故本文估算的主要是受陆地驱动力的地下水的向海排泄。

研究区海岛受陆地驱动力的SGD水量巨大,北岛SGD水量为 $3.5 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,南岛SGD水量为 $0.4 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。基于2012—2016年监测井的月平均SGD速率,北岛SGD水量平均值为 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,南岛SGD水量平均值为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

以往的水井水质调查结果表明,除少数靠近海边且开采量较大的水井水质咸化以外,绝大部分井水TDS小于 1 g/L ,水化学类型以 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl—Na}\cdot\text{Ca}$ 类型为主^[42]。水化学特征的统计结果显示,该研究区的地下水水质分布不均匀,结合以往的研究结果,氯化物浓度较高的地下水监测点与海水入侵、井水咸化的分布范围有密切联系。

基岩海岛的咸-淡水界面分布受地质构造控制,具有显著的非均质性。海拔低、地形平缓的城镇集中建设区域海水入侵风险较高,人为持续开采地下水会显著降低地下水水位,导致地下水漏斗、井水咸化等灾害。但基岩海岛沿岸的基岩山区可以有效阻挡海水入侵,补充和更新山谷地下水,这一特性在南岛东南海岸得到了验证。

4.2 地下水-海水相互作用的影响因素

降水对地下水-海水相互作用的影响主要是对水力梯度的变化产生影响,降水充足的7、8月份,地下水水头升高,井水位上升,表现为向海排泄的水力梯度,发生海水入侵的可能性小,地下水在含水层中参与一系列复杂的水岩相互作用和生物地球化学作用,排泄到海水中对近海岸水环境产生影响。而在几乎没有降水的冬春季,人类活动的参与就会显著影响水力梯度的变化。1970—1981年间,机井数量从12眼增加到54眼^[29],单井抽水量普遍高于自身的出水能力,地下水水量连年亏损,演变成向陆方向的水力梯度,导致海水入侵。

人为污染会使地下水向海排泄的营养盐浓度升高,庞忠和等^[16]、付兆堂等^[43]的研究中提到的硝酸盐污染源主要包括:(1)农村居民院内菜地的施肥及渗坑、厕所等生活污水来源;(2)岛屿水产品加工业相对较多,各个水产品加工企业基本上都有自备水井,渔养物资、海产品贝壳垃圾的无序堆放,也是地下水中硝酸盐污染的来源之一。例如南岛地下水观测井W3的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度由 1.15 mg/L 增大至 21 mg/L ,超过了世界卫生组织(WHO)饮用水水质准则的最大

污染水平(11.3 mg/L)^[44],甚至超过了我国生活饮用水标准 20 mg/L 。过量的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通过地下过程向海排泄,使得近海地区成为富营养化或藻类爆发性繁殖的潜在风险区。

4.3 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的通量变化

由于地下水中硝酸盐浓度升高,导致 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量有所升高。例如,南岛观测井W3地下水向海排泄的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量显著增大,由2016年10月的 $17.37 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 增大到2018年5月的 $317.19 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,增大为原来的18倍。2016年10月—2018年5月,南岛观测井W10地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量有所增加,增幅为原来的1.8倍。

北岛的W2与W4相比,W2受人类活动影响更大, $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度在 $35 \sim 40 \text{ mg/L}$,而我国生活饮用水卫生标准^[45]规定,地下水水源限制时, $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度超过 20 mg/L 则不适合作为生活饮用水。W4的水文地质条件更利于地下水向海排泄,SGD速率更大。

5 结论

(1)北岛的海水入侵程度普遍高于南岛,且北岛东南岸有严重海水入侵,局部地下水 Cl 质量浓度大于 2000 mg/L 。南岛的海水入侵状况相对较轻,但由于基岩含水层存在导水裂隙,海水入侵会沿着特定的路径发生,如南岛西岸的低缓居民区的海水入侵,就有东西连接成线的趋势。

(2)北岛东南沿海地区受到高山丘陵地形阻隔,形成天然的隔水屏障,西北部丘陵地区赋存的地下水无法提供补给,该地区地下水主要依靠大气降水,且距离海岸较近,地下水开采后容易诱发海水入侵。北岛东南地区是海水入侵的严重区域,地下水咸化明显,地下水水位长期低于海平面且逐年下降,2012—2016年海水入侵速率均值为 0.3 m/d ,向陆 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量均值为 $69.6 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。而在南岛东北岸、南岸的大部分地区,岩石中的微孔隙和微裂隙以及层间错动裂隙起到了一定的储水作用,能够保持地下水维持一定的水头高度而不受到海水入侵影响。因此南岛东北岸、南岸的大部分地区没有发生海水入侵,地下水向海排泄过程较稳定,2012—2016年地下水向海排泄速率均值为 0.2 m/d ,向海 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通量均值为 $81.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

(3)研究区受陆地驱动力的SGD水量巨大,北岛SGD水量为 $3.5 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,南岛SGD水量为 $0.4 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。基于2012—2016年监测井的月平均SGD速率,北岛SGD水量平均值为 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,南岛SGD水量平均值为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

未来的研究需要结合潮汐、营养盐、海平面上升、同位素示踪等数据进行岛屿地下水全面评估, 结合物探等手段定量识别基岩岛屿海水入侵的优先通道。

参考文献 (References) :

- [1] 李海龙, 王学静. 海底地下水排泄研究回顾与进展 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(6): 636 - 646. [LI Hailong, WANG Xuejing. Submarine groundwater discharge: A review [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(6): 636 - 646. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 周鹏鹏, 李国敏, 卢耀东, 等. 大陆岛地下水动力学特征——以湛江东海岛为例 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 12 - 18. [ZHOU Pengpeng, LI Guomin, LU Yaodong, et al. The hydrodynamic characteristics of groundwater in continental island: An example from Donghai Island, Zhanjiang [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 12 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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)]
- [4] VENGOSH A, GILL J, LEE DAVISSON M, et al. A multi-isotope (B, Sr, O, H, and C) and age dating (3H-3He and 14C) study of groundwater from Salinas Valley, California: Hydrochemistry, dynamics, and contamination processes [J]. Water Resources Research, 2002, 38(1): 1 - 17.
- [5] VENGOSH A, SPIVACK A J, ARTZI Y, et al. Geochemical and boron, strontium, and oxygen isotopic constraints on the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean Coast of Israel [J]. Water Resources Research, 1999, 35(6): 1877 - 1894.
- [6] JØRGENSEN N O, ANDERSEN M S, ENGESGAARD P. Investigation of a dynamic seawater intrusion event using strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) [J]. Journal of Hydrology, 2008, 348(3/4): 257 - 269.
- [7] RANJAN P, KAZAMA S, SAWAMOTO M, et al. Global scale evaluation of coastal fresh groundwater resources [J]. Ocean & Coastal Management, 2009, 52(3/4): 197 - 206.
- [8] PETELET-GIRAUD E, NÉGREL P, AUNAY B, et al. Coastal groundwater salinization: Focus on the vertical variability in a multi-layered aquifer through a multi-isotope fingerprinting (Roussillon Basin, France) [J]. Science of the Total Environment, 2016, 566/567: 398 - 415.
- [9] MAO Changping, TAN Hongbing, SONG Yinxian, et al. Evolution of groundwater chemistry in coastal aquifers of the Jiangsu, east China: Insights from a multi-isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and $\delta^{11}\text{B}$) approach [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2020, 235: 103730.
- [10] 郇恒飞, 郭常来, 崔健, 等. 音频大地电磁测深法在锦州海水入侵调查中的应用 [J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1720 - 1728. [HUAN Hengfei, GUO Changlai, CUI Jian, et al. Application of audio magnetotelluric sounding to the seawater intrusion survey of Jinzhou [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1720 - 1728. (in Chinese with English abstract)]
- [11] MOORE W S. The role of submarine groundwater discharge in coastal biogeochemistry [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88(1/2/3): 389 - 393.
- [12] WANG Xuejing, LI Hailong, ZHENG Chunmiao, et al. Submarine groundwater discharge as an important nutrient source influencing nutrient structure in coastal water of Daya Bay, China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 225: 52 - 65.
- [13] ADOLF J E, BURNS J, WALKER J K, et al. Near shore distributions of phytoplankton and bacteria in relation to submarine groundwater discharge-fed fishponds, Kona coast, Hawaii, USA [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 219: 341 - 353.
- [14] HAN Dongmei, CURRELL M J. Review of drivers and threats to coastal groundwater quality in China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150913.
- [15] 崔震, 陈广泉, 徐兴永, 等. 北长山岛海水入侵成因机理及现状评价 [J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 930 - 936. [CUI Zhen, CHEN Guangquan, XU Xingyong, et al. Mechanism and assessment of seawater intrusion in the Northern Changshan Island [J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(6): 930 - 936. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 庞忠和, 高明. 基岩海岛地下水资源与环境——以庙岛群岛为例 [J]. 勘察科学技术, 1988(3): 27 - 30. [PANG Zhonghe, GAO Ming. Groundwater resources and environment of bedrock islands: A case study of Miaodao Islands [J]. Investigation science and technology, 1988(3): 27 - 30. (in Chinese)]
- [17] RUTQVIST J. Fractured rock stress-permeability relationships from in situ data and effects of temperature

- and chemical-mechanical couplings[J]. *Crustal Permeability*, 2012; 65 – 82.
- [18] WANG Xuejing, LI Hailong, JIAO Jiu Jimmy, et al. Submarine fresh groundwater discharge into Laizhou Bay comparable to the Yellow River flux[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8814, 1 – 7.
- [19] ZHANG Yan, SANTOS I R, LI Hailong, et al. Submarine groundwater discharge drives coastal water quality and nutrient budgets at small and large scales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 290: 201 – 215.
- [20] 汪迂迂. 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)]
- [21] MA Qian, LI Hailong, WANG Xuejing, et al. Estimation of seawater-groundwater exchange rate: Case study in a tidal flat with a large-scale seepage face (Laizhou Bay, China)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23: 265 – 275.
- [22] JASECHKO S, PERRONE D, SEYBOLD H, et al. Groundwater level observations in 250 000 coastal US wells reveal scope of potential seawater intrusion[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3229.
- [23] HERRERA-GARCÍA G, EZQUERRO P, TOMÁS R, et al. Mapping the global threat of land subsidence[J]. *Science (New York, N Y)*, 2021, 371(6524): 34 – 36.
- [24] SAWYER A H, DAVID C H, FAMIGLIETTI J S. Continental patterns of submarine groundwater discharge reveal coastal vulnerabilities[J]. *Science*, 2016, 353(6300): 705 – 707.
- [25] 郇恒飞, 郭常来, 崔健,等. 音频大地电磁测深法在锦州海水入侵调查中的应用[J]. *地质通报*, 2021, 41(10): 1720 – 1728. [HUAN Hengfei, GUO Changlai, CUI Jian, et al. Application of audio magnetotelluric sounding to the seawater intrusion survey of Jinzhou[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 41(10): 1720 – 1728. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 朱君, 李婷, 陈超,等. 近海核电厂核素地下水释放通量的模型计算方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 201 – 211. [ZHU Jun, LI Ting, CHEN Chao, et al. Model calculation method of Radionuclide groundwater release flux of offshore nuclear power plants[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 201 – 211. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 庞忠和. 中国东部沿海基岩海岛地下水资源分布特点: 以庙岛群岛为例[J]. *地质科学*, 1987, 22(3): 291 – 299. [PANG Zhonghe. On the occurrence of the groundwater resources of the rocky Islands along the East China coast: A case study of Miaodao Islands[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1987, 22(3): 291 – 299. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张志忠, 丁雪, 邹亮,等. 南长山岛地下水资源与环境[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(9): 60 – 63. [ZHANG Zhizhong, DING Xue, ZOU Liang, et al. Groundwater resources and environment of south Changshan Island[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(9): 60 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 杜国云. 基岩海岸海水入侵特征及对策——以长岛县南北长山岛为例[J]. *海洋科学*, 2002(5): 55 – 59. [DU Guoyun. Character and countermeasure of seawater intrusion on bedrock such as south and north Changshan Island[J]. *Marine Sciences*, 2002(5): 55 – 59. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 山东省长岛海洋生态保护条例[J]. 山东省人民代表大会常务委员会公报, 2019(4): 458 – 467. [The Regulation of Marine Ecological protection in Changdao, Shandong Province[J]. *Bulletin of Standing Committee of Shandong Provincial People's Congress*, 2019(4): 458 – 467. (in Chinese)]
- [31] 李培英. 庙岛群岛的晚新生界与环境变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(4): 111 – 122. [LI Peiying. Late Cenozoic erathem and environmental vicissitudes of Miaodao archipelago, Shandong Province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7(4): 111 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 曹家欣, 严润娥, 王欢. 山东庙岛群岛的红色风化壳与棕红土及其古气候意义[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(2): 216 – 224. [CAO Jiaxin, YAN Rune, WANG Huan. Red weathering crust and brown-red soil and their paleoclimatic significance in Miaodao Archipelago, Shandong Province[J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(2): 216 – 224. (in Chinese)]
- [33] 肖楠森. 新构造裂隙水[J]. *水文地质工程地质*, 1981(4): 22 – 25. [XIAO Nansen. Neotectonic fissure water[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1981(4): 22 – 25. (in Chinese)]
- [34] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 第2版. 北京: 地质出版社, 2012. [China Geological Survey.

- Handbook of Hydrogeology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese)]
- [35] 潘晓园. 胶州湾某砂质潮滩含水层系统地下水流盐分运移数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [PAN Xiaoyuan. Numerical simulation of groundwater flow and salt transport in a sandy tidal aquifer system in Jiaozhou Bay, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [36] DOMENICO P A, SCHWARTZ F W. Physical and chemical hydrogeology[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1998.
- [37] CHANG Kang-tsung. 地理信息系统导论[M]. 陈健飞, 译. 8版. 北京: 科学出版社, 2016. [CHANG Kang-tsung. Introduction to Geographic Information Systems[M]. CHEN Jianfei, trans. 8th ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)]
- [38] 自然资源部第一海洋研究所. 海水入侵监测与评价技术规程: HY/T 0314-2021[S]. [First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources. Technical specification for monitoring and evaluation of seawater intrusion: HY/T 0314—2021[S]. (in Chinese)]
- [39] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 6版. 北京: 地质出版社, 2011: 53. [ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui, et al. Fundamentals of hydrogeology[M]. 6th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 53. (in Chinese)]
- [40] 中华人民共和国国土资源部, 水利部. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Ministry of Water Resources. Groundwater quality standard: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [41] 郭巧娜. 滨海多层含水层系统中多组分地下水流动及海底地下水排泄[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010. [GUO Qiaona. Multicomponent groundwater flow and submarine groundwater discharge in coastal multilayered aquifer systems[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 崔震. 北长山岛海水入侵特征及风险评价研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2015. [CUI Zhen. Analysis of seawater intrusion characteristics and assessment of seawater intrusion disaster in northern Changshan Island[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 付兆堂, 姜拥军, 冷恩基, 等. 庙岛群岛地下水污染的成因与防治对策[J]. 地下水, 2010, 32(2): 66. [FU Zhaotang, JIANG Yongjun, LENG Enji, et al. Causes and countermeasures of groundwater pollution in Miaodao Islands[J]. Groundwater, 2010, 32(2): 66. (in Chinese)]
- [44] WARD M H, JONES R R, BRENDER J D, et al. Drinking water nitrate and human health: An updated review[J]. [International Journal of Environmental Research and Public Health](#), 2018, 15(7): 1557.
- [45] 中华人民共和国卫生部, 建设部, 水利部, 等. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2006[S]. 北京: 中国质检出版社, 2006. [Ministry of Health of the People's Republic of China, Ministry of Construction, Ministry of Water Resources, et al. Sanitary standard for drinking water: GB 5749—2006[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2006. (in Chinese)]

编辑: 张若琳