

陈北辰, 李晴岚, 王正阳, 等. 2017—2022 年深圳海水入侵变化趋势及影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(1): 55-64.

CHEN Beichen, LI Qinglan, WANG Zhengyang, et al. Analysis on the change trend and influencing factors of seawater intrusion in Shenzhen from 2017 to 2022[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(1): 55-64.

2017—2022 年深圳海水入侵变化趋势及影响因素

陈北辰^{1,2,3,4}, 李晴岚^{1*}, 王正阳², 张洪岩², 李文博², 程靖清², 王晓³

(1 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055; 2 深圳市自然资源与不动产评估发展研究中心, 深圳 518040;

3 中国地质大学(武汉)海洋学院, 武汉 430074; 4 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054)

摘要:基于深圳市 25 个海水入侵监测孔 2017—2022 年的监测数据, 选用氯离子 (Cl^-) 浓度作为评价指标, 分析了深圳市海水入侵的空间分布及变化趋势。研究结果显示, 深圳市地下水层埋藏较浅, 水位高程变化较为稳定, 海水入侵主要分布在宝安沙井片区、南山中心区、盐田保税区及大鹏葵涌河口。研究结合了区域地质、岩土层类型、电阻率物探、降雨量变化和人类活动等要素, 分析结果表明, 开采地下水是造成海水入侵的重要因素, 第四纪断裂是海水入侵的潜在通道, 人工填土层区域容易受到海水入侵, 降雨量对海水入侵影响的相关性较小。本研究可为深圳市海水入侵防灾减灾管理提供参考。

关键词:海水入侵; 地下水; 氯离子浓度; 降雨量; 深圳市

中图分类号: P714⁺.6 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.003

0 引言

海水入侵是指在自然或人为因素影响下, 滨海地区地下含水层的水动力条件发生改变, 从而破坏了淡水与海水之间的平衡状态, 导致海水或高矿化度咸水沿含水层向内陆方向侵入的过程与现象^[1]。影响海水入侵的自然因素主要包括地质环境、岩土层物性、大气降雨、河流径流量、海洋潮汐和海平面上升等^[2-4]。人为因素主要包括滨海地区地下水开采、滨海工程建设等^[5-6]。海水入侵作为一种长期、缓慢型的海洋灾害类型, 会引发地区水质恶化、建筑物基础结构腐蚀等, 对社会生产活动和生态环境造成严重影响。

全世界有几十个国家和几百个地区发现了海

水入侵现象^[7], 对沿海地区社会经济的持续发展造成了严重危害。在中国的环渤海地区、珠江三角洲、北部湾沿海地区也发生了不同程度的海水入侵^[8], 并且出现了逐年增加的趋势^[9]。深圳作为沿海城市中经济活跃的城市之一, 聚集了千万人口, 在滨海地区和填海区内开展了大量轨道交通、地下工程、市政建筑等城市建设, 而海水入侵会对沿海工程建设产生严重的腐蚀性作用, 且对城市生态环境、地下水资源产生影响, 因此, 调研海水入侵现状并开展影响因素分析尤其重要。

目前, 对于深圳市海水入侵的研究主要集中在深圳市西部地区。赵锐锐等^[10]基于 GIS 对深圳市宝安区海水入侵的危险性进行分析, 构建了海水入侵危险性评估体系; 韩绘芳等^[11]以深圳市宝安区为典型研究区, 探讨了地下水化学在海水入侵影响下的演化及其指示意义; 耿雪峰等^[12]从海水入侵形成机理的角度出发, 对深圳市海水入侵的形成原因进行了分析; 余海忠等^[5-6]在深圳西部区域使用高密度电法的地球物理手段对海水入侵进行了研究, 认为在海水入侵区域, 地层的电阻率值与地下水的氯离子 (Cl^-) 浓度及矿化度之间存在一定的相关关系。然而, 前人研究缺乏对于深圳市海水入侵变化趋势及影响因素的讨论, 尤其是缺乏对于海水

收稿日期: 2023-01-04

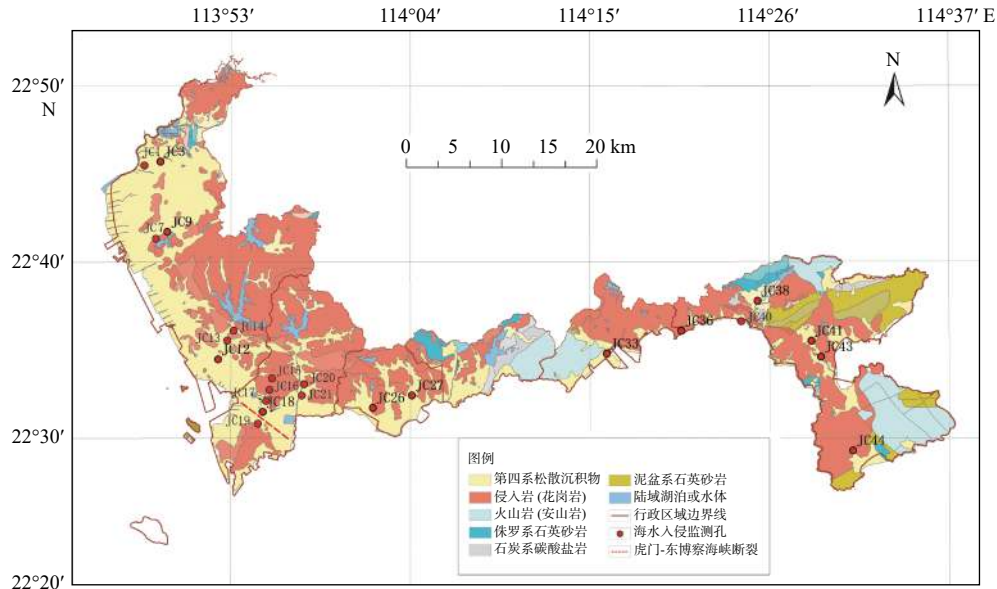
资助项目: 深圳市基础研究面上项目“登陆粤港澳大湾区台风降雨时空分布特征及机理研究”(JCYJ20210324101006016); 深圳市国际合作研究项目“粤港澳大湾区复杂地形条件下热带气旋近地面风场形成机制及预报研究”(GJHZ20210705141403010)

第一作者: 陈北辰(1991—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: beichensz@qq.com

* 通讯作者: 李晴岚(1971—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事气象领域的研究工作。E-mail: ql.li@siat.ac.cn

入侵水质样品的长期监测数据,难以满足当下研究工作及防灾减灾管理的需求。本研究基于分布在深圳市宝安区、南山区、福田区、罗湖区、盐田区和大鹏新区 25 个海水入侵监测井(图 1)地下水的长期监测数据,采用 Cl^- 浓度作为评价指标,对深圳市

海水入侵空间分布及变化趋势进行了分析。在此基础上,结合深圳市基础地质条件、水文地质条件、各行政区年度降雨量、地球物理勘探剖面及人为影响等因素,对海水入侵的空间分布、变化趋势及影响因素进行综合分析。



据文献 [13] 修改

图 1 深圳市沿海区域地质图

Fig.1 Geological map of coastal areas of Shenzhen City

1 研究区概况

1.1 区域地质

深圳市属于低山丘陵-海岸平原地貌,第四系松散覆盖层厚度较薄,大部分地区地表浅部以下就是岩石基底,火山岩、侵入岩和变质岩均有发育^[14-18],区域地质概况如图 1 所示。西部沿海区域毗邻珠江口,地貌类型以海积平原和河流平原为主,发育 20~50 m 厚度不等的第四系松散土层。岩土类型主要包括淤泥质土、粉质黏土、细砂、中砂、含砾质粗砂等。在宝安大空港、前海自贸区 and 深圳湾存在大面积的填海造陆区^[19-20]。东部沿海以丘陵海蚀地貌为主,沿海地带主要发育基岩型海岸,砂砾质海滩,局部有淤泥质海岸^[21-22]。海岸带后侧多为高丘陵及低山地貌,地势相对较高,岩石组成较为复杂。

1.2 海岸特征

深圳市海岸线总长 260.5 km,分为西部岸线和

东部岸线。西部岸线自宝安东宝河口至福田深圳河河口,主要为平原堆积,地表岩土层透水性较高。东部岸线自盐田沙头角至大鹏坝光,主要为基岩海岸^[21],其地表岩土层透水性相对较低。根据海岸带地形的形态及沉积物组成,可以做出进一步的划分:淤泥型海岸分布在宝安区沿岸、深圳湾沿岸、坝光海滩;河口型海岸分布在茅洲河、葵涌河等地带;红树林型海岸分布在滨海大道东部、坝光沿岸;基岩型海岸分布妈湾沿岸、大鹏半岛沿岸;砂砾型海岸主要分布在沙头角、大小梅沙、西涌-东涌等;填海型海岸为填海造陆而形成的人工海岸,主要分布在大空港片区、前海-后海片区和盐田港片区。

1.3 气象水文

深圳属于亚热带海洋性气候,深受季风的影响。夏季高温多雨,其余季节较为干燥。深圳 2008—2017 年的 10 年年均降雨量为 1 863.9 mm,5—8 月约占全年降雨的 64.4%,11 月到次年 2 月约占 8.5%^[23]。根据深圳市气象台数据显示,2017—2022 年,全市平均降雨量为 1 802.58 mm,其中,2018 年降雨量最多,为 2 047.3 mm,2020 年降雨量

最少,为 1 497.4 mm。降雨量西部较低而东部较高,呈现由西部向东部递增的势态。

在水文地质方面,深圳西部沿海地表为平坦的平原,覆盖第四系松散沉积物,周缘丘陵地区基岩裂隙发育,风化层厚度较大,有利于大气降水的渗入补给和汇集,形成丰富的松散岩类孔隙水,赋存于人工填土层、冲洪积层和海积层内。深圳东部海岸带多发育基岩山体,主要发育裂隙水,赋存于基岩风化带孔隙及裂隙网络中,其含水性受岩体裂隙发育程度、地势及地貌的影响。

2 材料与方法

2.1 监测孔分布

本次研究采用了 25 个监测孔月度水样数据进行分析,监测频率为每月 1 次,数据跨度为 2017 年 1 月至 2022 年 12 月。监测孔分布如图 1 所示,具体位置见表 1。

表 1 监测孔分布位置

监测孔	位置
JC1、JC3	宝安区沙井街道
JC7、JC9	宝安区西乡街道
JC12、JC13、JC14	宝安区西乡河街道
JC15	南山区南头街道
JC16、JC17、JC18、JC19	南山区南山街道
JC20	南山区沙河街道
JC25	福田区香蜜湖街道
JC26	福田区园岭街道
JC27	罗湖区桂园街道
JC33	盐田区梅沙街道
JC36、JC38、JC40	大鹏新区葵涌街道
JC41、JC43	大鹏新区大鹏街道
JC44、JC45、JC46	大鹏新区南澳街道

2.2 水样检测方法

每月底以人工采样方式对海水入侵监测井的表层水体进行采集。装水样容器为聚乙烯塑料瓶,用所采水样冲洗 2~3 次。每个监测孔采 1 组水样,分为 2 瓶,各 500 mL。采取水样时,采用缓缓流入瓶的方式,避免草根、砂、土等杂物进入瓶。采完水样后编写标签,并放置在阴凉处,并在 1 天内送至实验室进行测验。在样品水质分析过程中,Cl⁻浓度测试使用硝酸银容量法,采用分级沉淀的原理,以铬酸钾作指示剂,用 AgNO₃ 标准溶液滴定。

2.3 海水入侵指标

海水在长时间的演化过程中形成了稳定的主要成分,其总溶解固体约为 35 g/L, Cl⁻是海水中最主要的稳定常量元素^[24],含量可达 19 g/L^[25]。不同地区地下淡水中的化学成分较为多变,但 Cl⁻含量相对较少,浓度数据易获取,剪作性强,适合作为评判海水入侵的重要考察依据^[26]。根据行业标准《海水入侵监测与评价技术规程》^[27],可以据 Cl⁻浓度对海水入侵现状进行划分: Cl⁻浓度 < 250 mg/L,评判为无入侵; Cl⁻浓度介于 250~1 000 mg/L,评判为轻度入侵; Cl⁻浓度 > 1 000 mg/L,评判为严重入侵。该标准被国内研究人员广泛使用^[28-29]。本文结合深圳市实际情况,对海水入侵 Cl⁻浓度指标进一步划分,将海水入侵程度划分为无入侵、轻度入侵、中度入侵和重度入侵 4 级,分类标准如表 2。

表 2 海水入侵程度的等级划分

分级指标	I 级	II 级	III 级	IV 级
Cl ⁻ 浓度/(mg/L)	<250	250~500	500~1 000	>1 000
入侵程度	无入侵	轻度入侵	中度入侵	严重入侵

2.4 研究方法

针对海岸带 25 个监测孔 2017 年 1 月至 2022 年 12 月的监测数据,采用 Cl⁻浓度来表征海水入侵程度。由于采取人工采样的手段,部分监测孔在城市建设活动或自然灾害中受到破坏,部分月度数据缺失,因此,采用年内各月份数据的平均值作为全年度代表。通过 ArcGIS 空间插值分析手段,以 25 个监测孔的 Cl⁻浓度数据代表海水入侵的总体分布。在综合分析区域地质资料的基础之上,考虑地形地貌的因素,以不同类型海岸带的水文地质单元的海水入侵边界作为约束,绘制深圳市 2017—2022 年海水入侵空间分布模式图,并在此基础上,对海水入侵的变化趋势及影响因素进行分析。

3 结果与分析

3.1 Cl⁻浓度监测数据

监测孔水样 Cl⁻浓度的年度数据如表 3 所示。其中,JC1、JC3、JC12、JC18、JC33 和 JC40 监测井

中出现了不同程度的海水入侵。JC1 水样 Cl^- 浓度均值 $>11\,000\text{ mg/L}$, 属于严重的海水入侵。JC3 水样 Cl^- 浓度最大值为 $6\,141\text{ mg/L}$, 最小值为 457 mg/L , 海水入侵程度属于严重到中度。JC12 水样 Cl^- 浓度最大值为 349 mg/L , 最小值为 88 mg/L , 海水入侵程度属于中度到无。JC18 水样 Cl^- 浓度最大值为

$11\,855\text{ mg/L}$, 最小值为 $3\,611\text{ mg/L}$, 海水入侵程度属于严重。JC33 水样 Cl^- 浓度最大值 $14\,865\text{ mg/L}$, 最小值 $10\,821\text{ mg/L}$, 海水入侵程度属于严重。JC40 水样 Cl^- 浓度最大值 $16\,120\text{ mg/L}$, 最小值 173 mg/L , 海水入侵程度各年间数值波动极大。其余监测孔水样没有监测到持续或成规模的海水入侵现象。

表 3 2017—2022 年 Cl^- 浓度平均值

Table 3 Average Cl^- concentration from 2017 to 2022

编号							mg/L
	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	平均
JC1	11 591.68	13 448.77	12 464.13	13 089.77	12 776.13	12 151.94	12 587.07
JC3	6 141.00	4 022.13	1 895.48	724.78	927.00	457.11	2 361.25
JC7	3 304.80	110.87	66.23	50.20	30.33	16.79	596.54
JC9	42.68	26.02	24.23	21.71	16.76	11.70	23.85
JC12	323.12	218.09	88.38	99.97	175.38	349.41	209.06
JC13	132.57	125.51	140.22	58.84	201.70	195.35	142.37
JC14	42.55	50.32	81.09	70.74	189.23	220.04	109.00
JC15	49.86	68.44	77.85	78.65	118.96	139.15	88.82
JC16	22.74	19.78	22.25	19.63	17.84	17.74	20.00
JC17	19.85	19.20	22.24	24.08	22.83	15.99	20.70
JC18	4 116.09	4 112.99	3 611.30	10 087.64	11 449.98	11 855.65	7 538.94
JC19	68.78	42.24	37.52	40.59	39.35	42.46	45.16
JC20	91.47	89.00	88.86	60.99	37.55	46.57	69.07
JC25	18.69	19.18	19.12	22.07	17.28	20.17	19.42
JC26	37.69	29.49	25.29	28.35	31.88	23.06	29.29
JC27	17.78	28.93	19.04	20.84	18.44	18.72	20.63
JC33	14 605.75	12 217.55	14 865.97	12 038.01	10 821.64	11 576.55	12 687.58
JC36	20.17	23.53	23.46	22.64	20.47	16.64	21.15
JC38	487.55	58.80	53.18	53.21	40.52	44.48	122.96
JC40	15 784.23	15 370.59	5 440.97	173.33	6 102.88	16 120.67	9 832.11
JC41	40.63	41.70	33.04	33.52	102.99	29.87	46.96
JC43	50.71	51.25	616.56	37.53	38.80	47.41	140.38
JC44	24.82	23.67	48.30	20.94	28.00	20.63	27.73
JC45	42.68	39.46	40.93	38.62	54.72	37.32	42.29
JC46	40.76	43.43	41.23	40.95	61.82	30.13	43.05

3.2 海水入侵空间分布特征

根据 2017—2022 年 25 个监测孔水样的 Cl^- 浓度数据, 使用 ArcGIS 空间插值分析为手段, 以区域地质条件和地下水体分布作为约束条件, 得出深圳市海水入侵的总体分布区域(图 2), 主要包括宝安区、南山区、盐田区和大鹏新区。不同颜色代表不同的海水入侵程度, 图 2 中 4 个黑色方框代表了海水入侵发生的主要区域。

区域 1 属于宝安区北部的沙井片区, 海水入侵呈现出面状发育的特征。区域内存在的海水入侵

监测井为 J1、JC3、JC7 和 JC9。其中, JC1 位于茅洲河口, 2017—2022 年海水入侵程度一直较大; JC3 位于茅洲流域, 2017 年为严重海水入侵, 2020 年为中度海水入侵, 2022 年为轻度海水入侵, 海水入侵程度出现了显著降低; JC7 和 JC9 在 2017 年后未出现海水入侵情况, 说明该区域的海水入侵现象出现了逆转。

区域 2 属于南山区的中心区域, 海水入侵呈现出条带状发育的特征。区域内海水入侵监测井为 JC15—JC20。其中, JC18 出现了显著的海水入侵现象, 属于严重海水入侵, 水样 Cl^- 浓度在 2017—2019

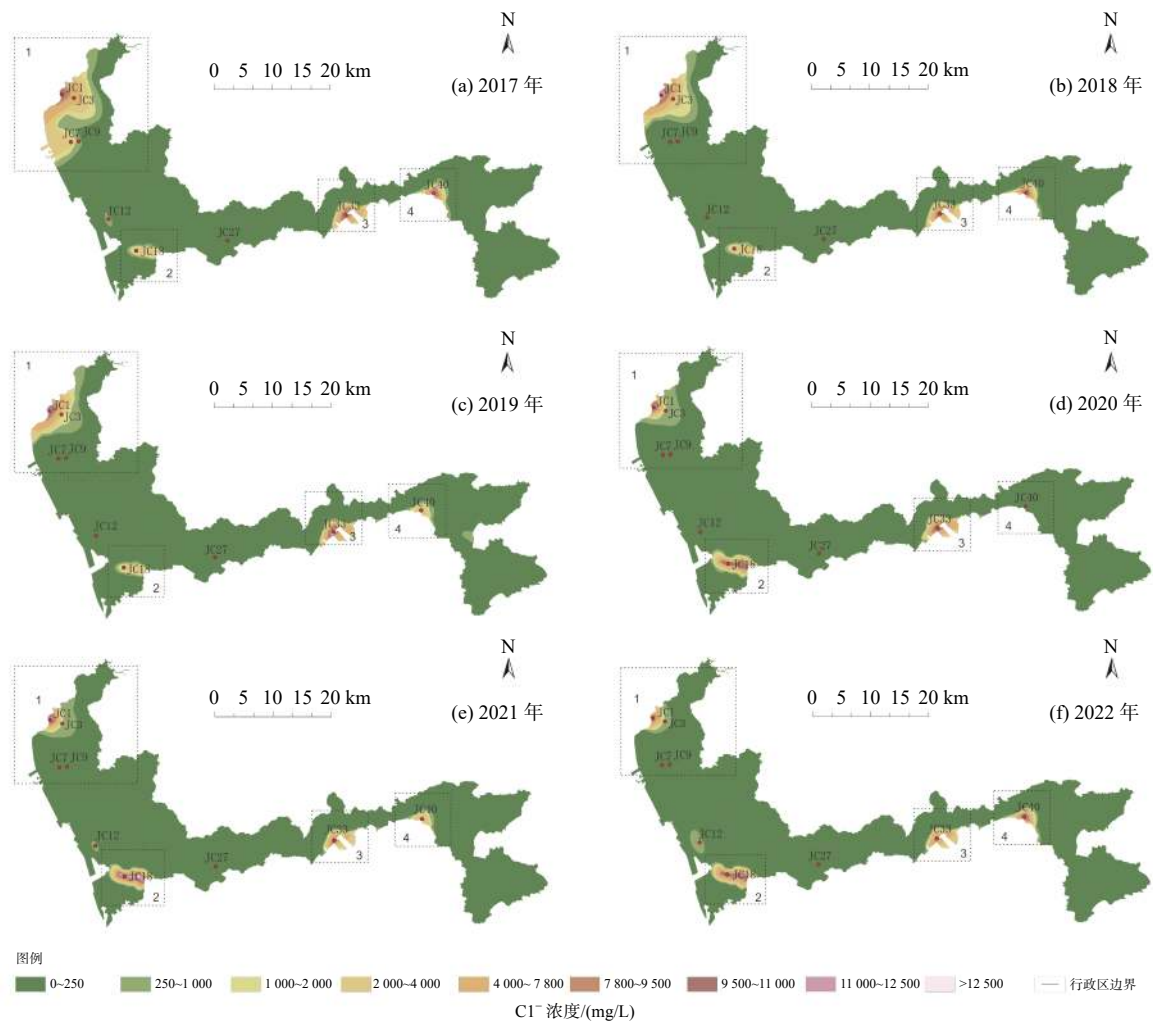


图 2 基于 25 个监测孔海水入侵空间分布

Fig.2 Spatial distribution of seawater intrusion based on data from 25 monitoring wells

年为约 4000 mg/L, 至 2020 年出现了显著上升, 2021 年和 2022 年仍呈现上升趋势, 水样 Cl^- 浓度均 $>10\,000\text{ mg/L}$ 。而与 JC18 毗邻的监测井水样数据中的 Cl^- 浓度均 $<100\text{ mg/L}$, 说明该区域的海水入侵是沿着 EW 方向呈狭长条带形状分布。

区域 3 属于盐田区沿海的盐田港自贸区, 海水入侵呈现出点状发育的特征。区域内海水入侵监测井为 JC33, 该监测井处于填海造陆地带, 在整个监测时段中, 其水样 Cl^- 浓度均 $>10\,000\text{ mg/L}$ 。2017 年和 2019 年 Cl^- 浓度达到了高值区间, 2021 年和 2022 年出现了一定程度的降低(表 2)。综上所述, 该区域海水入侵程度严重, 且处于稳定的状态。

区域 4 属于葵涌河流域, 海水入侵呈现出点状发育特征。区域内海水入侵监测井为 JC38 和 JC40。其中, JC38 监测井位于葵涌河流域, 2017 年 Cl^- 浓度为 487 mg/L, 海水入侵程度为轻度, 2018—2022

年 Cl^- 浓度均 $<122\text{ mg/L}$, 属无海水入侵级别; JC40 位于葵涌河口, Cl^- 浓度在 2017 年和 2018 年约为 15000 mg/L, 2019 年出现显著下降, 约为 5500 mg/L, 为严重海水入侵程度; 2020 年持续降低到 173 mg/L, 海水入侵程度为无, 2021 年和 2022 年持续上升, 分别达到 6100 mg/L 和 16100 mg/L, 为严重海水入侵程度。综上, 葵涌河口区域的海水入侵程度出现了 V 字型的反转, 目前处于严重海水入侵程度。

4 讨论

4.1 岩性

选取 12 个分布于不同地貌单元的监测孔, 对地层岩性因素与海水入侵程度的相关性进行研究, 监测孔的基本信息如表 4 所示。根据监测孔的工程建设历史资料进行清理、绘制, 其岩土柱状图如

图3所示。统计采集水样中监测到的地下水位
最高值和最低值,根据监测孔的地下水位高程,对

应其岩土柱状图的高程,可以查明地下水赋存的岩
土层类型。

表4 海水入侵监测典型钻孔的地理信息

Table 4 Geographic information of typical boreholes for seawater intrusion monitoring

监测孔	海岸名称	海岸带类型	地表高程/m	最大水位标高/m	最小水位标高/m
JC3	茅洲河口	河口型海岸	3.76	3.09	0.06
JC9	沙井	淤泥型海岸	9.93	9.27	8.76
JC12	西乡-福永	填土型海岸	4.44	2.61	0.56
JC18	前海-后海	填土型海岸	3.72	2.60	1.41
JC26	福田红树林	红树林海岸	7.05	5.20	1.84
JC27	深圳河	河口型海岸	5.40	2.86	1.12
JC33	盐田港	填土型海岸	4.01	1.30	0.16
JC36	深葵路	基岩型海岸	25.5	25.5	25.5
JC38	沙鱼涌	河口型海岸	24.5	20.4	19.8
JC41	水头村	河口型海岸	3.72	2.60	1.41
JC43	水头村	河口型海岸	5.28	1.69	0.61
JC44	西涌	砂砾型海岸	3.95	3.79	3.04

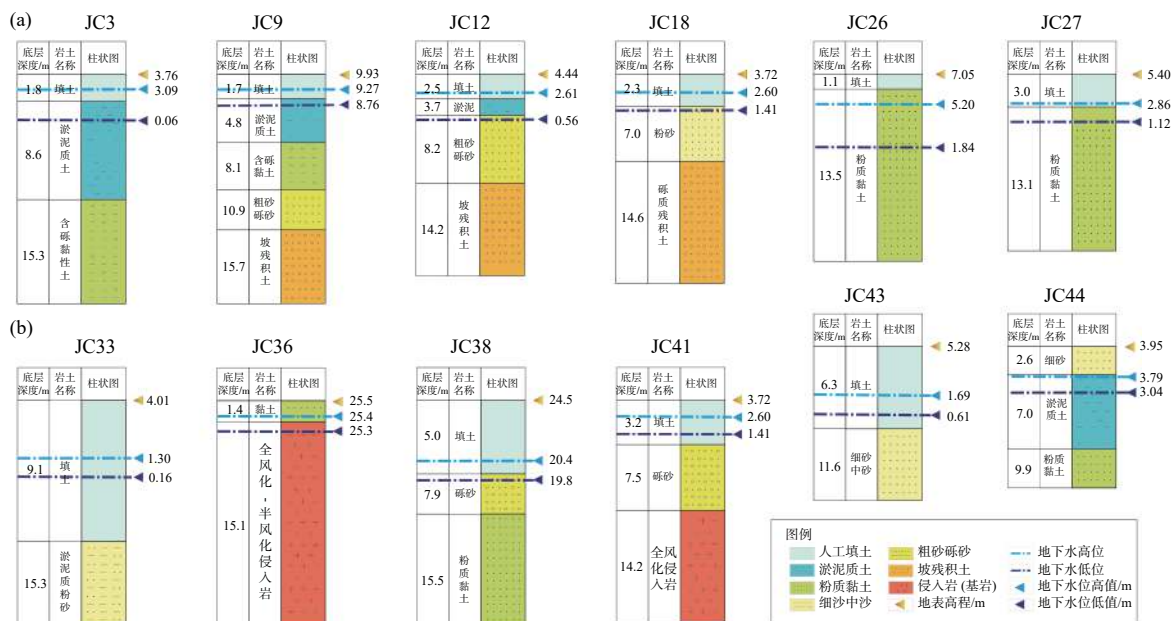


图3 监测孔地层岩性及地下水标高变化

Fig.3 Lithology and groundwater elevations of the monitoring holes

在深圳西部沿海(图3a), JC3、JC12和JC18监测孔含水层位于人工填土层内,该类型土层孔隙发育,透水性好,对应的海岸带为围海造陆的海岸,显示出了明显的海水入侵现象。JC9监测孔含水层位于淤泥质土层内,该类型土层透水性较差,无海水入侵现象。JC26和JC27地下水含水层位于粉质黏土层内,对应淤泥质红树林海岸,无海水入侵现象。

在深圳东部沿海(图3b), JC33监测孔含水层

位于人工填土层内,地下水的海水入侵程度严重。JC36含水层位于风化基岩层内,属于基岩裂隙水,且地势较高,没有出现海水入侵。JC38监测孔的位置距离海岸带较远,含水层位于填土和砾砂层之间,在2017年监测到轻微的海水入侵。JC41距离海岸较远,没有出现海水入侵现象。JC44监测孔含水层位于淤泥质土层内,无海水入侵现象。

监测井海水入侵程度和岩土层类型的对比结果表明:①人工填土层是海水入侵的潜在通道,若

围海造陆区对应的人工填土层毗邻海水,且与陆域地下水系统分离时,会成为海水入侵的危险区域;②砾砂质土层透水性较好,是海水入侵的潜在通道,但由于砾砂质海岸毗邻基岩区,通常具有较高的高程,因此没有出现持续的海水入侵现象;③粉质黏土或淤泥质土层透水性较差,通常可以视为隔水层,对海水入侵现象起到了隔断作用;④粉质黏土或淤泥质土层为主的平原地带,即使海拔高程较低,也不容易形成海水入侵。

4.2 断裂

断裂系统是海水潜在的入侵通道。根据区域地质调查资料,南山中心区域(图 2 中区域 2)发育多组 NW 向的第四纪断层^[30],其中,虎门-东博寮海峡断裂隐伏于南山区中心城区地下,沿南山区深圳大学、深圳湾体育中心一带,最后穿过深圳湾进入香港屯门等地。高密度电法反演研究显示^[31],位于南山区滨海大道和科苑大道交汇处存在断裂分布,且断裂内部填充了侵入的海水,导致电阻率剖面基本呈现低阻特征。断裂两侧岩体在横向上变化较稳定,隔绝了海水的入侵。该处 NW 向第四纪断裂走向与监测孔 JC15—JC19 位置的连线方向近乎垂直,通过 JC18 附近。根据高密度电法反演,可推断出断裂的走向及其具有富含海水的特征,有效地解

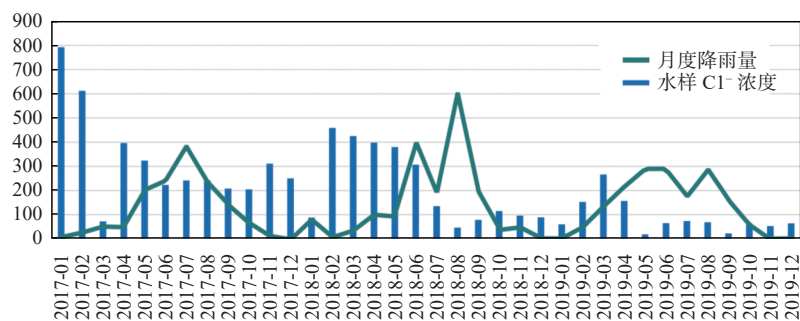
释了邻区中只有 JC18 监测孔出现了高 Cl^- 浓度值,而其他监测孔均呈现出低 Cl^- 浓度值的现象。在结合区域地质和填海造陆建设的基础之上,推断该第四纪断裂是海水入侵的重要通道,导致了南山中心区域局部海水入侵严重,且呈现出狭长带状的海水入侵形态。

4.3 降雨量

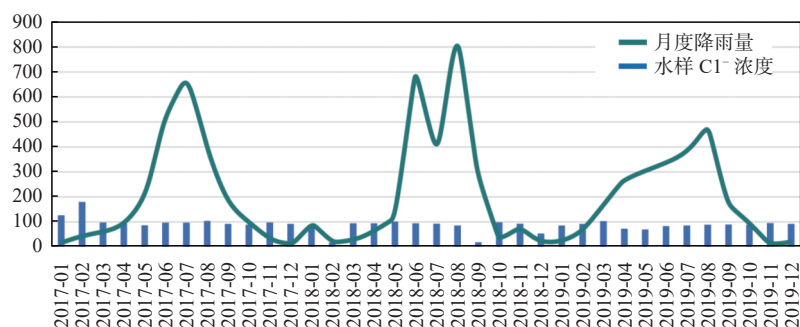
前人对于海水入侵规律的研究表明,在开阔沉积平原地带的降雨量与海水入侵程度具有较为明显的负相关关系,即降雨量的增加对于海水入侵有着抑制作用^[32]。反之,降水量减少会导致地下水的水位下降,使得咸淡水界面向陆地方向迁移,海水入侵现象加剧。

根据位于开阔沉积平原地貌的 JC12 监测孔水样月度 Cl^- 浓度与其所在宝安区的降雨量进行对比(图 4a),显示 2017—2019 年宝安区的降雨量在雨季 4—10 月处于高值, Cl^- 浓度呈现出明显的下降趋势;降雨量在 11 月到次年 3 月整体处于低值,而 Cl^- 浓度在这些月份显著升高,整体上呈现出较好的负相关。JC27 监测孔水样的 Cl^- 浓度与其对应行政区降雨量的对比结果显示,两者并不存在明显的相关性(图 4b)。

通过对 25 个监测孔 Cl^- 浓度与月度或年度降



(a) 2017—2019 年期间 JC12 监测孔 Cl^- 浓度与降雨量对比图



(b) 2017—2019 年期间 JC27 监测孔 Cl^- 浓度与降雨量对比图

图 4 2017—2019 年海水入侵氯离子浓度与降雨量对比

Fig.4 The Cl^- concentration duo to seawater intrusion versus rainfall during 2017-2019

雨量的相关分析计算可知:①对于处于平原地貌,海水入侵程度变化较为稳定的监测孔,在同一年内降雨量的变化对于海水入侵具有相关性,降雨量增加则海水入侵程度降低,相关性系数计算结果多介于 $-0.2\sim-0.4$;②对于绝大多数的监测孔,年度降雨量的变化与海水入侵的相关性差,相关性系数多数 <0.1 ;③区别于广阔且具有较厚第四系沉积物的平原地带,深圳市海岸带狭长且第四系覆盖层较薄,降雨量因素对于海水入侵程度的变化影响较小。

4.4 地下水开采

研究表明,过量开采地下水会导致地下水位快速下降,打破滨海地区地下咸水和淡水的平衡^[29],这是造成海水入侵的主要影响因素之一。图2中区域1位于宝安区北部的沙井片区,分布着大量的工业园区,早年在工业生产中有过量开采地下水的现象。随着2018年深圳市政府关于地下水禁采区和限采区划分方案的颁布,规定整个西部沿海地区均为地下水的禁采区后,监测孔JC3水样 Cl^- 浓度从2018年的4 022 mg/L开始逐年降低,到2020年为724 mg/L,属于中度海水入侵,到2022年降低到457 mg/L,属于轻度海水入侵。JC7也展现出了同样趋势,水样 Cl^- 浓度在2017年高达3 304 mg/L,到2018年快速降低到110 mg/L,此后均无海水入侵的现象。可以看出,在沙井片区海水入侵程度的降低是区域性的,过量开采地下水是造成海水入侵的主要因素。

4.5 填海工程

在与陆域地下水系统毗邻的情况下,填海造地行为会明显改变原来的地下水补、径、排条件。大规模填海工程导致海岸线向海移动,增大了地下水接受补给面积,从而增加了地下淡水资源含量,使得咸淡水界面向海方向发生相应的移动,即海水入侵程度降低^[5]。通过对前海区域高密度电法反演剖面的分析表明,其电阻率随孔隙度、含水率增大而减小。如图5所示,在南山区西部的前海区域,第四系粉质黏土及人工填土的电阻率一般为 $50\sim 500\ \Omega\cdot\text{m}$,花岗岩电阻率一般为 $500\sim 5\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。根据区域高密度电法反演的经验,海水入侵的区域视电阻率值 $<30\ \Omega\cdot\text{m}$ 为严重海水入侵, $30\sim 50\ \Omega\cdot\text{m}$ 为轻度海水入侵^[5-6],因此判断前海区域没有出现大范围海水入侵的现象。

在与陆域地下水系统分离的情况下,填海区域本身难以形成自身的地下水赋存体系,由于上覆的人工填土层地层透水性较好,海水会沿着人工填土层进行渗透,造成严重海水入侵的现象。位于图2区域3的盐田港保税区,监测水样的 Cl^- 浓度显示出稳定且严重的海水入侵。尽管历年来 Cl^- 浓度数据因为降雨、潮汐和人类活动等因素影响而导致年度上的变化,但高值的 Cl^- 浓度指标表明填海区域的地下水受到海水入侵影响极大。填海造陆区域,尤其是人工填土层与陆域地下水系统的联通关系是预防海水入侵研究的关键问题。

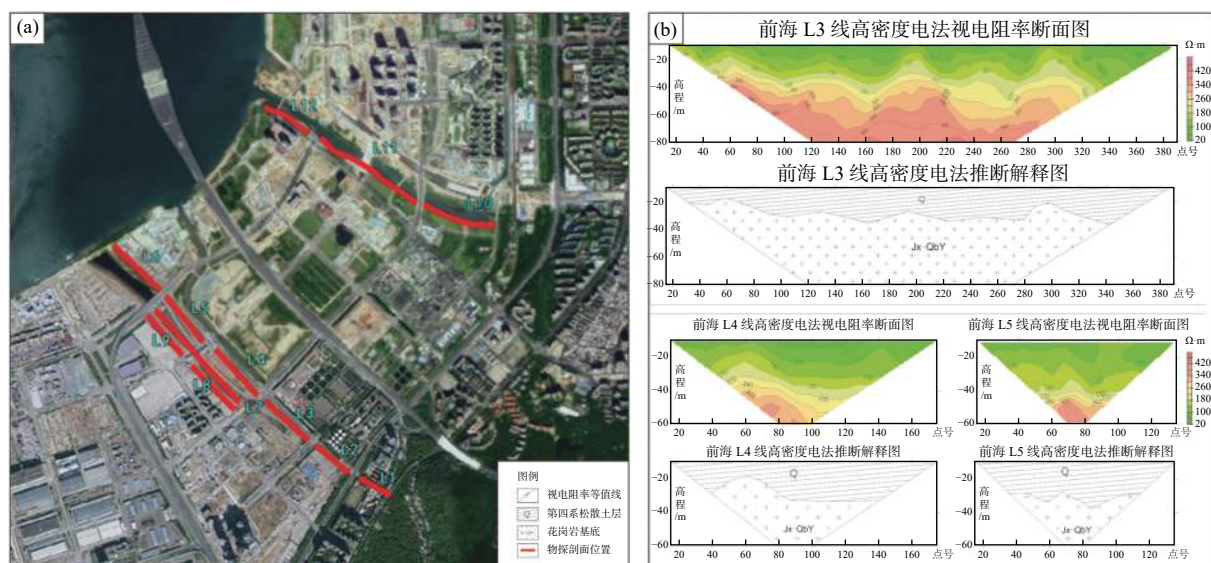


图5 前海区高密度电法反演剖面

Fig.5 High-density electrical inversion section in the Qianhai area

5 结论

(1)分布规律:根据25个海水入侵监测孔 Cl^- 浓度显示,深圳市海水入侵局部发生在宝安沙井片区、南山中心片区、盐田港保税区和葵涌河口。在西部沿岸呈现面状或条带状分布样式,在东部沿岸呈现出点状分布样式。2017—2022年,宝安沙井片区海水入侵程度大幅度降低,南山中心区局部地带海水入侵程度严重,盐田港保税区海水入侵程度严重且稳定,葵涌河口海水入侵程度经历了严重到轻度再到严重的“V”型反转。

(2)控制因素:人工填土层内的水文地质条件是影响填海造陆区海水入侵程度的重要因素;第四纪断裂是海水入侵的潜在通道,海水入侵存在着沿断裂走向迁移的倾向;降雨量对深圳市海水入侵的影响较小,两者没有显著的相关性;抽取地下水是造成海水入侵的重要因素,禁止大规模开采地下水后,海水入侵现象会得到有效反转,即海水入侵程度降低。

(3)建议:综合基础地质条件分析,深圳市海岸带狭长,海平面较低,滨海区域地层岩性变化极大,对海水入侵的防治需要根据地貌单元进行详细划分;宜采用监测孔水样 Cl^- 浓度与高密度电法反演的物探手段对海水入侵进行监测;人工填土层和第四纪断裂是海水入侵的潜在通道,需要重点关注;禁止大规模开采地下水是防治海水入侵的关键政策。

参考文献:

- [1] 陈广泉. 莱州湾地区海水入侵的影响机制及预警评价研究[D]. 上海:华东师范大学, 2013.
- [2] 熊贵耀, 付腾飞, 徐兴永, 等. 滨海含水层海水入侵影响因素研究综述[J]. 海洋科学, 2019, 43(6): 102-112.
- [3] CHANG S W, CLEMENT T P, SIMPSON M J, et al. Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion?[J]. *Advances in water resources*, 2011, 34(10): 1283-1291.
- [4] WERNER A D, SIMMONS C T. Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers[J]. *Groundwater*, 2009, 47(2): 197-204.
- [5] 余海忠, 冯书才. 深圳填海工程对海水入侵的影响研究[J]. 山西建筑, 2015, 41(4): 56-58.
- [6] 余海忠, 冯书才, 曾奇. 采用物探方法研究深圳西部海水入侵现状[J]. 山西建筑, 2015, 41(14): 56-58.
- [7] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15.
- [8] SHI L, JIAO J J. Seawater intrusion and coastal aquifer management in China: a review[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2811-2819.
- [9] 高茂生, 骆永明. 我国重点海岸带地下水资源问题与海水入侵防控[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1197-1203.
- [10] 赵锐锐, 成建梅, 刘军, 等. 基于GIS的海水入侵危险性评价方法: 以深圳市宝安区为例[J]. 地质科技情报, 2009, 28(5): 96-100, 108.
- [11] 韩绘芳, 蒋方媛, 王谊. 海水入侵影响下的地下水化学演化及其指示意义: 以深圳市宝安区为例[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(4): 1-5.
- [12] 耿雪峰, 肖林超, 汪磊. 深圳市海水入侵形成原因分析[J]. 山西建筑, 2014, 40(13): 68-70.
- [13] 广东省地质矿产局区域地质调查大队. 中华人民共和国深圳地质图1:50000(附说明书)[M]. 北京:地质出版社, 1989.
- [14] 周良, 王洋, 杜学斌, 等. 珠江三角洲西缘晚第四纪沉积演化和最大海侵古岸线的重建[J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 119-135.
- [15] 张运标. 深圳地区第四系主要地层特征探讨[J]. 广州建筑, 2011, 39(5): 3-10.
- [16] 徐俊, 肖兵, 余成华, 等. 深圳市第四纪地层综合剖面的建立[J]. 城市勘测, 2011(4): 155-160.
- [17] 卢演传, 孙建中. 广东深圳断裂带活动性的第四纪地质和地貌研究[J]. 地震地质, 1991, 13(2): 138-146.
- [18] 卢演传, 孙建中. 广东深圳全新世海岸线变迁和地壳垂直形变速率估计[J]. 地震地质, 1990, 12(1): 76-78.
- [19] 周吕, 施显健, 任超, 等. 哨兵-1A合成孔径雷达的深圳围填海区域地面沉降监测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8765-8769.
- [20] 施显健. 深圳地区1997—2020年地面沉降InSAR时序监测与机理分析[D]. 桂林:桂林理工大学, 2020.
- [21] 张崧, 孙现领, 王为, 等. 广东深圳大鹏半岛海岸地貌特征[J]. 热带地理, 2013, 33(6): 647-658.
- [22] 滕建彬, 沈建伟, PEDOJA K. 深圳西冲湾的海蚀地貌与海滩沉积研究[J]. 现代地质, 2007, 21(3): 511-517.
- [23] 卢晓雄, 李晴岚, 陈申鹏, 等. 2008—2017年深圳降水时空特征研究[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 171-178.
- [24] 赵建. 海水入侵水化学指标及污染程度评价研究[J]. 地理科学, 1998, 18(1): 21-29.
- [25] TOLMAN C F, POLAND J F. Ground-water, salt-water infiltration, and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1940, 21(1): 23-35.
- [26] 李雪, 叶思源. 海水入侵调查方法研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 211-217.
- [27] 自然资源部第一海洋研究所, 国家海洋环境检测中心. HY/T 0314-2021 海水入侵监测与评价技术规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2021: 1-24.
- [28] 李波, 胡舒娅, 赵全升. 莱州湾沿岸海水入侵区地下水化学特征[J]. 世界地质, 2020, 39(4): 971-977.
- [29] 赵景丽, 邓跃, 徐艳东, 等. 2011—2016年莱州市海水入侵发展趋势分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(9): 136-142.

- [30] 曹新文, 马秀敏, 龚淑云, 等. 深圳北西向断裂分布特征及其活动性研究[J]. 地质力学学报, 2018, 24(6): 759-767. [32] 刘森. 莱州湾南岸地下咸水演化和咸水入侵过程机制研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [31] 曹新文. 深圳市南山区隐伏断裂第四纪活动性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.

Analysis on the change trend and influencing factors of seawater intrusion in Shenzhen from 2017 to 2022

CHEN Beichen^{1,2,3,4}, LI Qinglan^{1*}, WANG Zhengyang², ZHANG Hongyan²,
LI Wenbo², CHENG Jingqing², WANG Xiao³

(1 Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 2 Shenzhen Natural Resources and Real Estate Assessment and Development Research Center, Shenzhen 518040, China; 3 College of Oceanography, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4 Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: Based on the data of 25 monitoring wells on seawater intrusion in Shenzhen, from 2017 to 2022, and using Cl^- concentration as the evaluation index, the spatial distribution and variation trend of seawater intrusion in Shenzhen were analyzed. Results show that the buried groundwater layer in Shenzhen is relatively shallow, and the change of water level elevation was relatively stable. Seawater intrusion was detected mainly in the Shajing area of Bao'an, the central area of Nanshan, the Yantian Free Trade Zone, and the mouth of the Kwai Chung River in Dapeng. Meanwhile, the factors including regional geology, rock and soil types, resistivity geophysical prospecting, rainfall changes, and human activities were considered, and results show that the exploitation of groundwater is an important factor causing seawater intrusion. The Quaternary faults are potential channels for seawater intrusion. The land reclamation area is vulnerable to seawater intrusion. The correlation between rainfall and seawater intrusion is small. This study provided a reference for the disaster prevention of seawater intrusion in Shenzhen.

Key words: seawater intrusion; groundwater; chloride concentration; rainfall; Shenzhen