

莱州湾南岸海水入侵变化趋势及成因分析

刘莹^{1,2}, 姜锡仁^{1,2}, 王兴^{1,2}, 李保磊¹, 姜欢欢¹

(1. 国家海洋局北海环境监测中心, 山东 青岛 266033; 2. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266033)

摘要: 为了探讨滨海经济快速发展形势下莱州湾南岸海水入侵范围变化及其控制因素, 利用 2011—2015 年 4 月份(枯水期)莱州湾南岸地下水潜水层 TDS(可溶性固体总量)、Cl⁻质量浓度连续监测数据, 结合历史资料, 分析莱州湾南岸海水入侵分布特征。结果表明, 近 5 年来研究区地下水 Cl⁻质量浓度均值为 13.4 g/L, 呈由岸向内陆快速减小趋势; 研究区海水入侵呈带状分布, 2015 年入侵线向内陆伸入超过 45 km, 入侵范围较 1980 年向陆扩张约 11~30 km。通过对比分析得出, 研究区年均降雨量、地下水位埋深及地下水超采面积与海水入侵面积呈显著线性相关, 发现持续干旱气候、地下淡水超采是导致海水入侵扩张的主要因素, 卤水开发、海水养殖及莱州湾沿岸河流拦蓄工程进一步导致海水入侵的加剧。

关键词: 莱州湾; 海水入侵; 降雨量; 地下水超采

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)02-0108-10

DOI: 10.11759/hyhx20170111002

世界上超过 60%的人口居住在海岸带地区, 受海平面上升、降雨量减少等自然因素及不合理人类活动工程、超采地下水等人为因素影响, 海水入侵是个全球性普遍问题^[1-2]。特别是在干旱、半干旱气候条件下, 地下水为主要或唯一供水来源地区, 海水入侵尤为严重。海水入侵一旦发生就会使得地下水中矿化度不断升高, 最终引起地下水水质恶化, 淡水资源短缺, 导致海岸带生态系统衰退^[3-4]。

莱州湾南岸海水入侵程度和范围为我国环渤海地区最严重的区域, 海水入侵面积由 20 世纪 90 年代的 435 km² 快速扩张至 2007 年的 2 500 km²^[5-6]。该区域海水入侵研究主要集中于通过地下水中水化学要素、离子比及饱和度等特征, 揭示研究区的海水与地下水相互作用规律, 识别海水入侵过程, 对海水入侵机制、水体盐化机理等方面进行了较为深入的分析与探讨^[7-11], 对于研究区海水入侵范围的连续监测及演化机制研究不多。苗青等^[12]对自 1976 年莱州湾出现海水入侵以来至 2010 年间入侵灾害演化过程进行了分析, 认为莱州湾沿岸地区海水入侵经历了初始、发展、恶化、缓解 4 个发展阶段。但随着近几年莱州湾南岸滨海经济快速发展, 海岸带开发利用方式发生明显变化, 人类活动干预导致该区域海水入侵形势存在不确定性。由于莱州湾区域地质条件特殊, 其南岸同时存在海水入侵和咸水入侵^[11], 本文主要对海(咸)水入侵范围变化进行探讨, 对入

侵来源区分并非重点, 因此本文对两者不再区分, 统称为“海水入侵”。

基于此, 本文通过对近 5 年来莱州湾南岸地下水监测, 分析滨海经济快速发展形势下莱州湾南岸海水入侵的程度及范围, 研究其变化趋势, 探讨其主要影响因素, 为莱州湾地区海水入侵趋势预测及灾害控制等提供科学依据。

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于莱州湾南岸、山东省潍坊市辖区内, 属于潍北平原的一部分。地势南高北低, 高程从南部的 30 m 降到北部滨海地区的 1~2 m。潍河、虞河和胶莱河从研究区流入莱州湾。该区年均气温 12.6℃, 多年平均降雨量(1971—2010 年)660 mm, 多年平均蒸发量(1971—2010 年)1 802 mm, 降雨量远低于蒸发量。

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-09-26

基金项目: 2016 年北海分局海洋科技项目(2016B06)

[Foundation: Marine Science and Technology Foundation of the North China Sea Branch of State Oceanic Administration, No.2016B06]

作者简介: 刘莹(1985-), 女, 山东聊城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事海域海岸带地质研究, E-mail: 94476388@qq.com; 王兴, 通信作者, 男, 浙江绍兴人, 学士, 高级工程师, 主要从事近海动力环境、海洋生态灾害风险和模型研究, E-mail: sino1983@sina.com

莱州湾南岸晚更新世以来第四纪沉积地层发育,其南部主要为冲洪积平原,发育形成了众多埋藏古河道;北部主要为三期海相沉积^[13-15]。晚更新世发生的3次海侵和古气候冷暖交替导致了研究区地层中滞留海水蒸发、浓缩,并沿古河道砂层下渗、聚集,形成高浓度的地下卤水^[16-17]。这些高矿化度的地下卤水呈条带状东西向分布,与海岸线基本平行^[18]。

1.2 材料与方法

1.2.1 站位布设

研究范围包括了潍坊寿光、寒亭、昌邑等莱州湾南部沿岸区域,东西两侧以潍坊市行政界线为界,

沿岸线由海向陆延伸约 50 km(图 1)。自西向东布设寿光、滨海、寒亭、昌邑柳疃、昌邑下营 5 个监测断面, 15 个观测井, 断面方向为地下水流动方向, 尽量保证有观测井位于非海水入侵区, 以实现海水入侵界线的预测。

1.2.2 样品分析

2011—2015 年, 每年 4 月份(枯水期)分别在所设站位的观测井采集潜水层地下水样品。通过实验室分析获取地下水样中 Cl^- 和 TDS(可溶性固体总量)质量浓度, Cl^- 和 TDS 质量浓度测定分别按照 GB 11896-1989^[19]和 SL 79-1994^[20]相关要求执行。

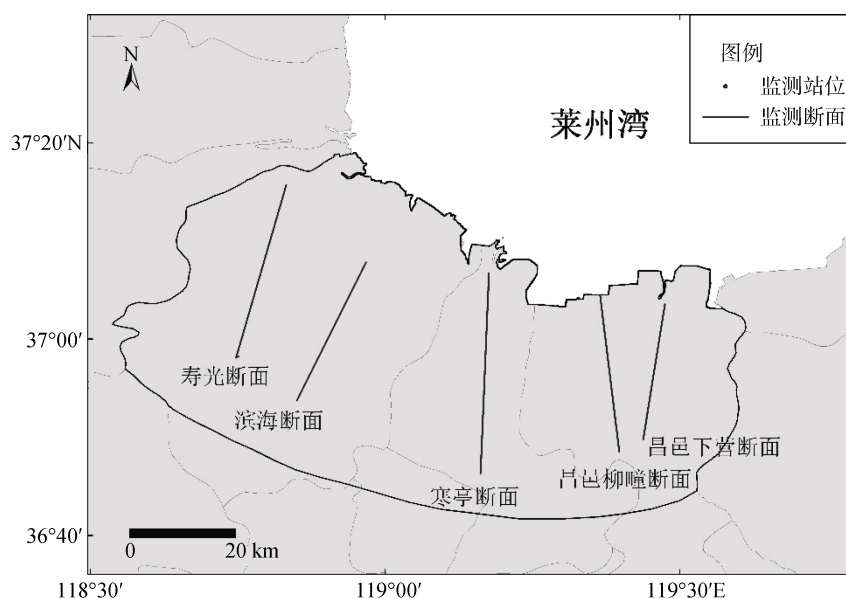


图 1 研究区示意图及观测井分布

Fig. 1 The sketch map of the study area and observation points

1.2.3 研究方法

地下水中 Cl^- 具有溶解度大、不易沉淀析出等特点, 是水体中最稳定的离子, 可以直接反映海水的侵染作用, 是判断海(咸)水入侵最直接、最敏感的指标, 也是最常用的指标^[18, 20-21], 本文采用 Cl^- 质量浓度分布来表征海水入侵程度的空间分布。

对近 5 年研究区地下水 Cl^- 质量浓度变化进行分析, 结合 GIS 地统计分析模块中数据普通 QQ 图、半方差统计方法, 对比趋势面法、反距离加权法及克里金法等空间插值方法。比较发现: 监测数据经对数转化后符合近似的正态分布, 采用普通克里金法插值效果较好。

因此, 结合 surfer 与 ArcGIS 10.2 的地统计模块, 对研究区 Cl^- 质量浓度进行对数转换, 采用普通克里金法插值计算, 确定研究区海水入侵界线(轻度入侵:

$m(Cl^-) < 0.25$ g/L, 严重入侵: $m(Cl^-) > 1$ g/L。 $m(Cl^-)$ 表示 Cl^- 的质量浓度), 分析其空间分布特征。采用 ArcGIS 10.2 软件量算功能计算海水入侵距离与面积, 结合历史资料分析莱州湾南岸海水入侵范围变化趋势及其成因。

2 结果与分析

2.1 Cl^- 和 TDS 数据结果

对 5 个监测断面地下水样连续 5 年的测试结果进行统计性特征值分析(表 2)。统计结果显示, 2011—2015 年 Cl^- 质量浓度介于 0.013~73.3 g/L, TDS 质量浓度介于 0.51~145.6 g/L, 约有 88% 的站位和 67% 的站位地下水 Cl^- 质量浓度分别达海水入侵 Ⅱ级和 Ⅲ级标准(表 1), 反映了近 5 年来莱州湾南岸持续严重的海水入侵现象。一般把溶解性总固体(TDS) > 50 g/L 的

水称为卤水^[18], 研究区寿光、寒亭、昌邑柳疃监测断面离岸最近观测井中 TDS 质量浓度远大于 50 g/L, 反映了研究区地下水中有卤水赋存。

根据历年各监测断面 Cl^- 、TDS 质量浓度及离岸线距离对比图(图 3), Cl^- 、TDS 质量浓度普遍由海向

陆快速减小, 反映了海水入侵方向为由海向陆。但是, 各监测断面 Cl^- 、TDS 质量浓度与离岸线距离并非简单线性关系, 表明除了咸、淡水简单混合作用外, 地下水中化学要素对水文地质条件、地形地貌、水文气象及人类活动等外界环境的影响敏感。

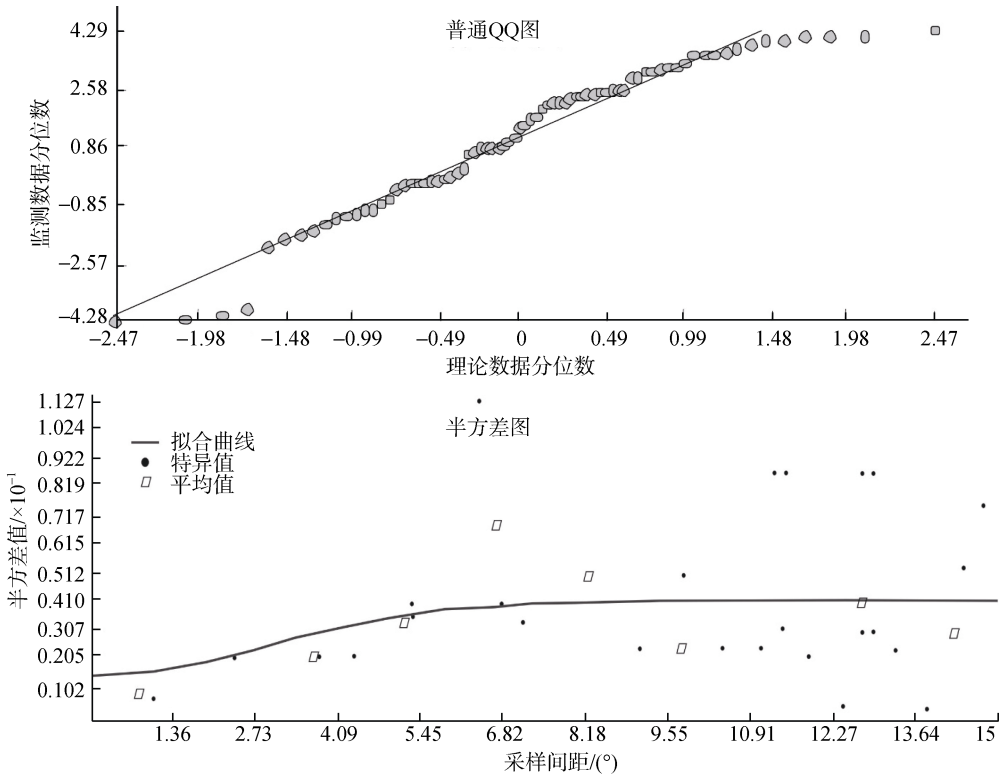


图 2 研究区 Cl^- 监测数据普通 QQ 图和半方差图

Fig. 2 Normal QQ plot and semi-variogram of Cl^- in the study area

表 1 海水入侵水化学观测指标与入侵程度等级划分

Tab. 1 Chemical index and division of the degree of intrusion

分级指标	$m(\text{Cl}^-)/(\text{g/L})$	$m(\text{TDS})/(\text{g/L})$	入侵程度	水质分类范围
	<0.25	<1.0	无入侵	淡水
	0.25~1.0	1.0~3.0	轻度入侵	微咸水
	>1.0	>3.0	严重入侵	咸水

注: 源自文献[20]; $m(\text{TDS})$ 表示 TDS 质量浓度

表 2 2011—2015 年研究区地下水水化学参数特征值

Tab. 2 The chemical characteristic value of groundwater in the study area during 2011—2015

监测时间	$m(\text{Cl}^-)/(\text{g/L})$		$m(\text{TDS})/(\text{g/L})$	
	范围	均值	范围	均值
2011 年 4 月	0.017~58.6	13.9	0.89~126.2	31.4
2012 年 4 月	0.021~73.3	15.5	0.84~139.8	31.5
2013 年 4 月	0.013~58.8	14.5	0.51~140.7	38.8
2014 年 4 月	0.014~57.6	12.7	0.78~145.6	30.2
2015 年 4 月	0.18~38.4	10.3	1.13~127.6	26.7

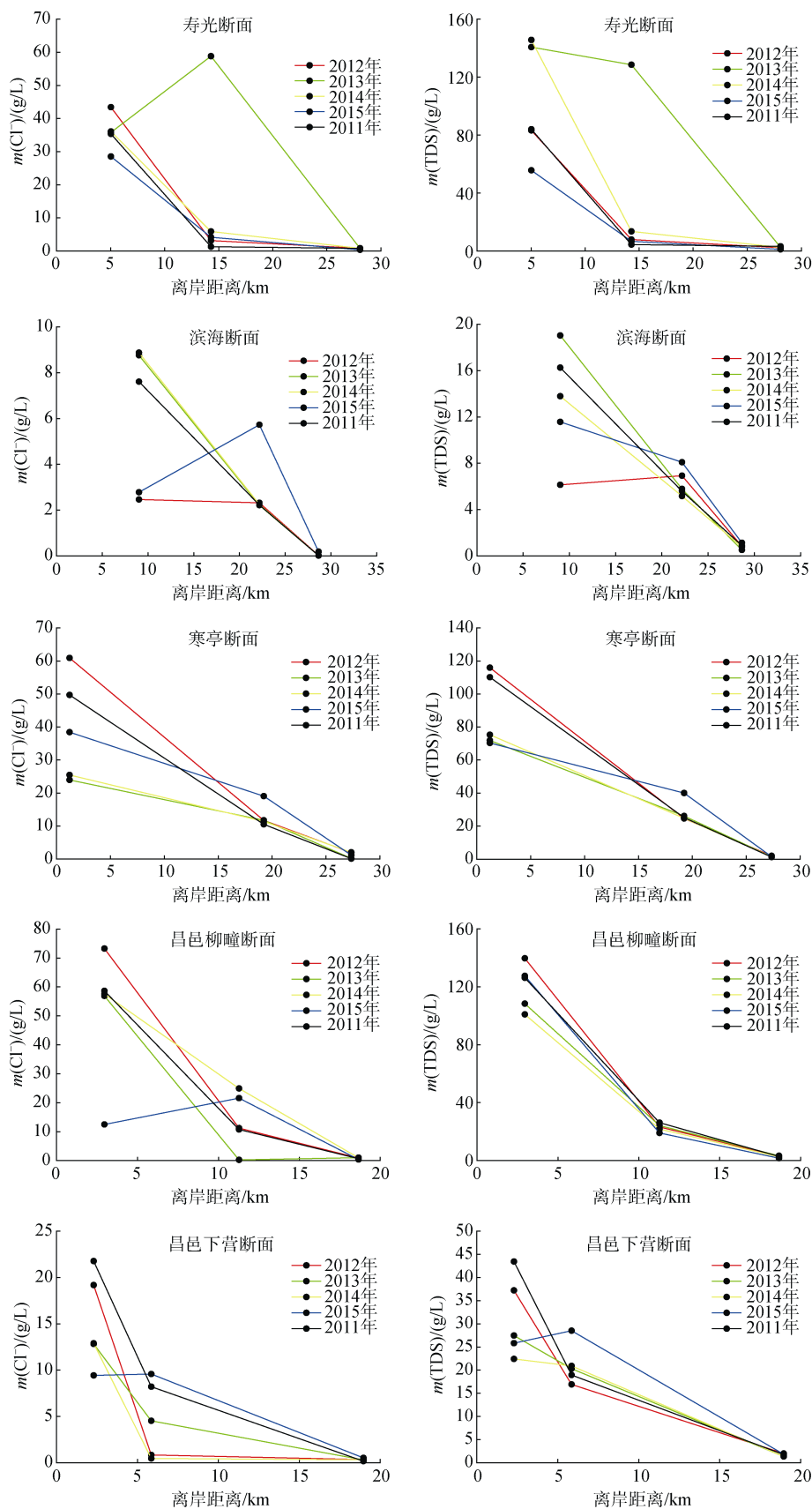


图3 研究区监测断面 Cl^- 、TDS 质量浓度及离岸距离对比图

Fig. 3 Concentration of Cl^- 、TDS vs distance from the shoreline of the monitoring sections

2.2 海水入侵空间分布特征

根据观测井地下水样品中 Cl^- 质量浓度, 结合普通克里金法进行插值分析, 确定研究区未海水入侵区、轻度海水入侵区、严重海水入侵区 (Cl^- 质量浓度 < 0.25 、 $0.25 \sim 1$ 、 > 1 g/L)(图 4)。研究区海水入

侵呈现显著的空间结构特征, 表现为地下水中 Cl^- 质量浓度由陆向海方向增加明显, 向海依次出现未入侵区、轻度入侵和严重入侵区, 地下水类型呈现由淡水、微咸水、咸水直至卤水的变化规律, 呈明显带状分布。

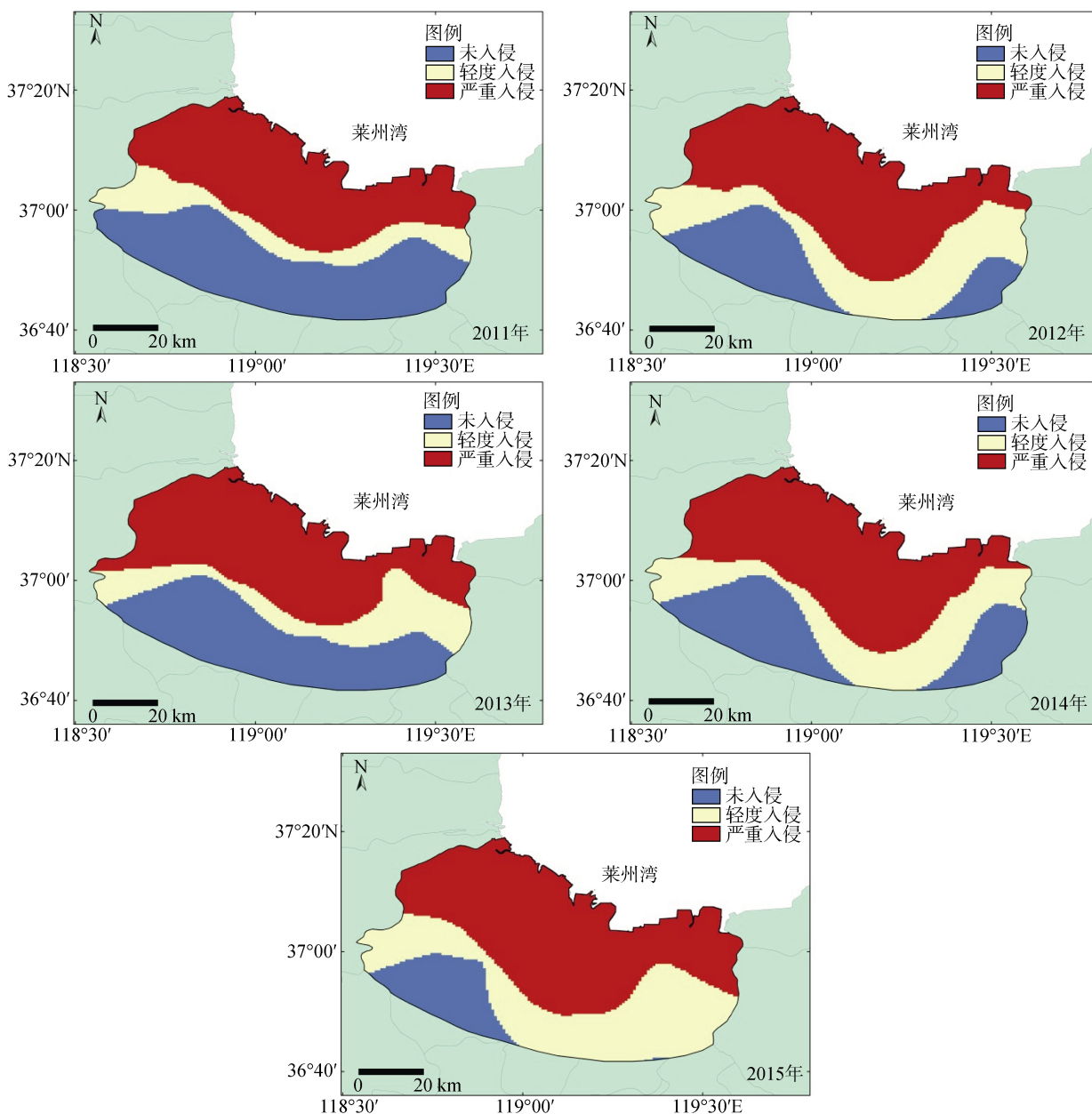


图 4 2011—2015 年研究区海水入侵空间分布对比

Fig. 4 Comparison of seawater intrusion distribution in 2011–2015

莱州湾南岸海水入侵呈连续片状分布。结合苗青等^[12]对莱州湾地区 1980—2010 年海水入侵灾害演化数据, 发现除 2012 年研究区海水入侵范围异常增大外, 莱州湾南岸海水入侵灾害自 1980 年以来持续恶化, 入侵线基本呈向陆逐渐推进趋势, 至 2015 年入侵线距离

岸线超过 45 km, 较 1980 年向内陆推进 11~30 km。

总体而言, 海水入侵线基本平行于岸线, 入侵面积呈增大趋势(图 5)。2012 年、2014 年、2015 年入侵线在寒亭地区楔形推进, 局部区域海水入侵区超出研究范围, 反映了这 3 年该区域海水入侵程度

尤其严重，入侵线向陆推进明显，应增加该区域监测站位，以更准确监控其入侵程度及范围。

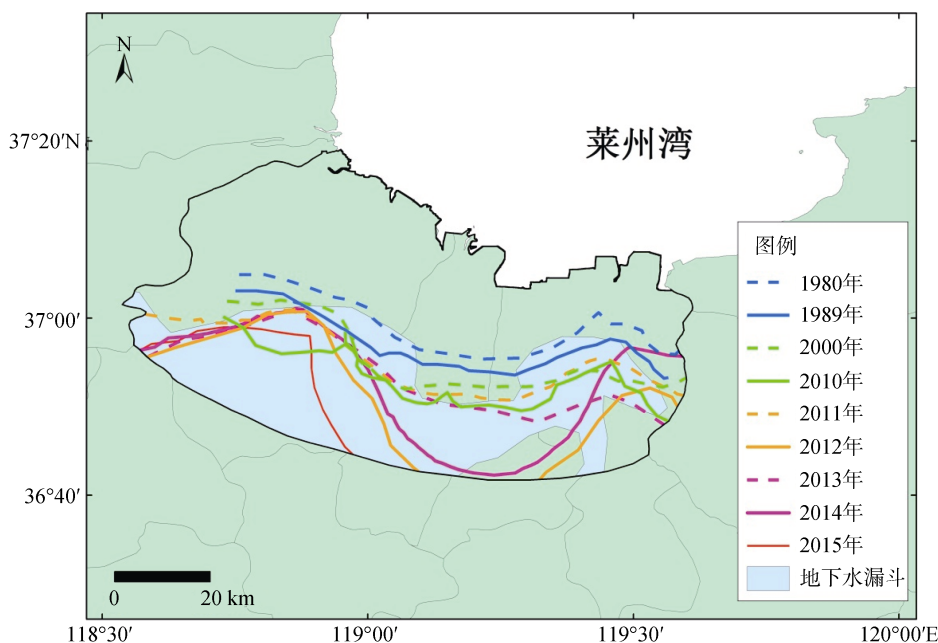


图 5 莱州湾南岸海水入侵范围演变

Fig. 5 The range evolution of seawater intrusion in the south coast of the Laizhou Bay

3 讨论

近 5 年来，莱州湾南岸海水入侵范围广、面积大，为渤海区、甚至全国范围内海水入侵中最为严重区域^[24]。为了分析莱州湾南岸海水入侵范围演变及成因，本文结合入侵来源，重点对海水入侵影响因素，如降雨量、地下水开采、沿海经济开发活动等方面进行讨论。

3.1 海水入侵来源

依据入侵物源将广义海水入侵划分为两类：来源于现代海水的狭义海水入侵和源于浅层第四纪沉积层中古海水的咸水入侵^[11]。除了 TDS、 Cl^- 质量浓度以外，地下水中化学离子质量浓度比值 ($m(\text{Na})/m(\text{Cl})$)、 $m(\text{Cl})/m(\text{Br})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{Ca})$ 、 $m(\text{Mg})/m(\text{SO}_4+\text{HCO}_3)$)、 ^{18}O 、 ^2H 同位素特征与海水、淡水中差异均作为海水入侵特征重要指示依据^[25-26]。郭笃发^[27]与张传奇等^[10]利用离子比值与主成分分析方法对莱州湾地下水盐化特征进行了分析，充分证实了莱州湾地下水中除了海-淡水机械混合作用外，还存在蒸发沉积、矿物溶解、阳离子交换作用以及人类活动影响。胡云壮等^[11]、卜庆伟等^[28]利用地下水中稳定同位素 ^{18}O 、 ^2H 识别地下水来源，结果显示研究区地下水中 ^{18}O 、 ^2H 介于地下淡水和卤水、海水之间，并

且蒸发混合线的相关性要差于卤水的相关性，指示该区域卤水的混合作用更占优势。

本文利用近 5 年来研究区地下水样品中 Cl^- 与 TDS 相关性分析，发现研究区地下水样品中 Cl^- 与 TDS 呈明显正相关(图 6)，说明了海水入侵带入的大量 Cl^- 是地下水矿化度升高的主要原因，反映了研究区地下水受海水入侵的影响。尽管大部分地下水样落在 1:1 线上或附近，但仍存在部分水样(站位 SG-1、CYLT-1)位于 1:1 线下方，即 TDS 富集站位 Cl^- 相对亏损。上述站位均位于卤水区，为晚更新世海侵滞留海水蒸发、浓缩形成高浓度的地下卤水^[9]，这也为莱州湾南岸咸水具有现代海水、古海水及包

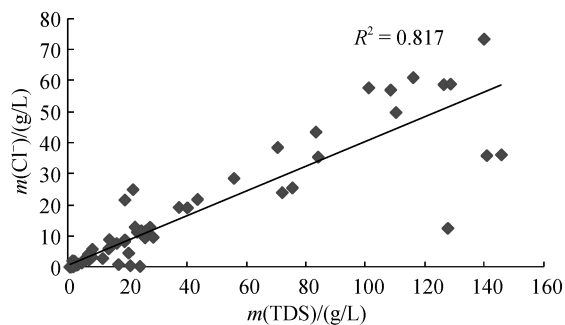


图 6 研究区地下水样品中 Cl^- 与 TDS 散点图

Fig. 6 Scatter plot graph with Cl^- and TDS of groundwater samples in the study area

含于第四系含水层及基岩裂隙或缝隙中的卤水等混合源特征^[27, 29]提供佐证。

3.2 海水入侵影响因素

3.2.1 降雨量减少

从长期趋势上看,近年来莱州湾沿岸干旱少雨,降雨量远低于蒸发量。自20世纪70年代以来,潍坊市年降雨量呈波动减少趋势,年均降雨量倾向率为 -22.67 mm/a ^[22]。这与1980年以来莱州湾南岸海(咸)水

入侵范围逐年增加趋势恰恰相反(图5),反映了持续干旱的气候可能是导致研究区海水入侵加剧的诱因之一。

对近5年来研究区海水入侵面积与降雨量分析,发现近5年来,潍坊市年均降雨量呈下降趋势,与之相对应,2011—2015年海水入侵面积总体上逐年增加(图7)。根据潍坊市夏汛前降雨量变化,2012年汛前降雨量最低,降雨量为 60 mm ^[30],可能是导致2012年海水入侵面积异常高的原因之一。

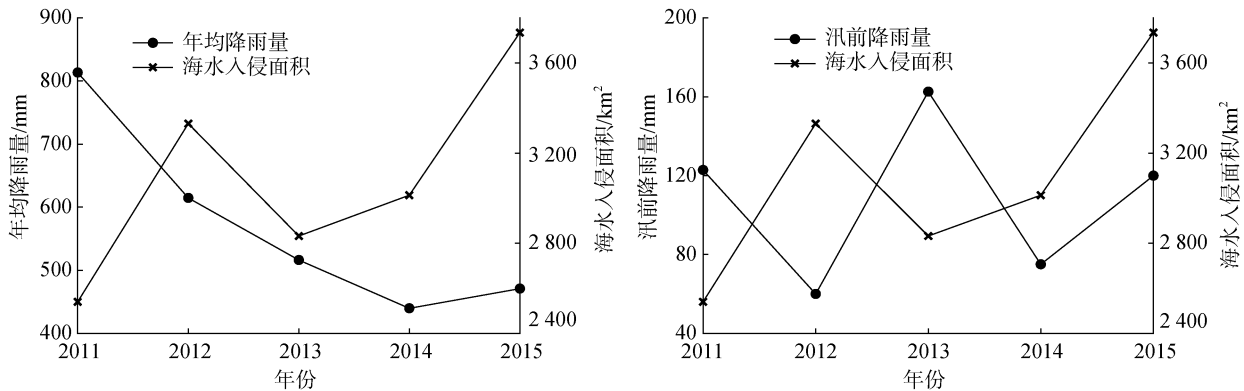


图7 降雨量与海水入侵面积对比图

Fig. 7 Comparison between rainfall and the seawater intrusion areas

3.2.2 地下水过度开采

莱州湾地区淡水资源匮乏,且该区工农业密集,特别是枯水期,地下水为工农业用水主要来源,导致地下水位迅速降低。莱州湾南岸出现寿光-昌邑、昌邑城区、昌乐朱刘店多个地下水漏斗区,地下水水位长期低于海平面,为莱州湾南岸海水向陆入侵提供了动力条件^[23]。利用山东省水利厅2013年4月水情月报中地下水漏斗范围^[23]并将其与海水入侵线叠加,发现2013年海水入侵线已达地下水位漏斗区域(图5)。

由于缺少实时地下水位数据,本文收集了2013—

2015年潍坊市汛前(1—5月)平均地下水位埋深与地下水超采面积数据^[30],发现随着地下水超采面积的增大,地下水位降低,研究区海水入侵面积也相应增大(图8)。以2015年为例,2015年潍坊市地下水位埋深为 13 m ,地下水超采面积达 $2\,553\text{ km}^2$,水位下降幅度及地下水超采面积为近3年之最;并且2015年潍坊市北部寿光、寒亭、昌邑地区汛前地下水位降幅分别为 7.64 、 7.36 、 3.04 m ,远超2013年同期降幅(1.24 、 2.99 、 0.01 m),反映了地下水超采是造成莱州湾南岸海水入侵的主要影响因素之一。

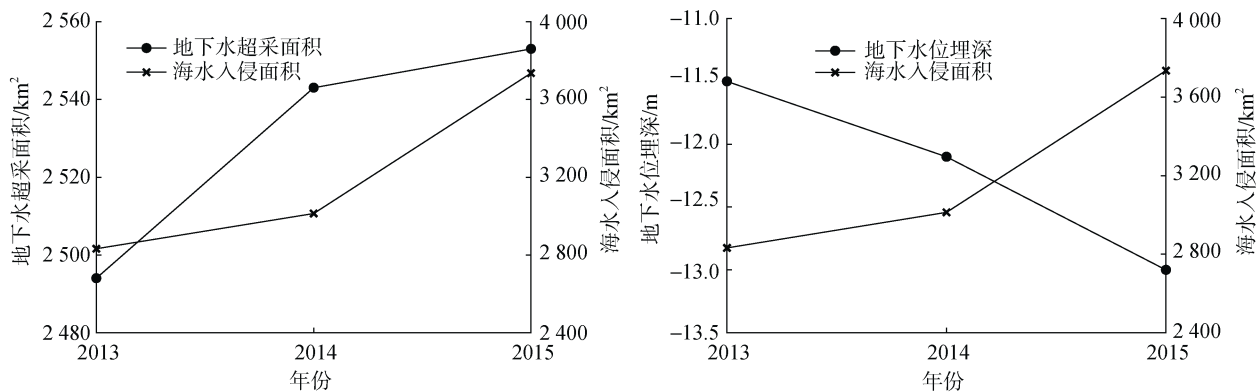


图8 研究区海水入侵面积与超采面积及地下水位埋深对比

Fig. 8 Comparison of the area of seawater intrusion and the overproduction area and the buried depth of the groundwater level

3.2.3 人类活动工程

河流拦蓄工程也是导致研究区海水入侵的原因之一。莱州湾沿岸河流上游修建了大量的水库、塘坝,在雨量偏少的年份大大减少了沿岸平原的地表径流,使下游地下水补给来源减少,造成沿海区域地下水位下降,加重了海水入侵。随着沿海地区人类经济活动强度的不断增大,越来越多的滩涂滨海湿地景观受到围垦、养殖和滨海卤水资源开采等人类活动影响,人类活动已成为滨海区域景观格局变化的主要驱动力^[31-32]。近年来,莱州湾南岸地下卤水开发和海水养殖不断发展,盐田、虾池面积不断增加,且逐渐向内陆扩张,内陆腹地约 20 km 处仍有盐田、虾池存在,使大量海水进入内陆,并渗入到地下淡水中,也是加重海水入侵的可能原因。

4 结论

对 2011—2015 年莱州湾南岸地下水样品进行取样,监测结果显示,研究区 Cl⁻ 质量浓度介于 0.013~73.3 g/L, TDS 质量浓度介于 0.51~145.6 g/L,且其浓度由海岸线向内陆快速减小。研究区海水入侵呈连续带状分布,海水入侵形势持续恶化,入侵线逐渐向内陆推进,2015 年入侵线向陆伸入超过 45 km,入侵范围较 1980 年向内陆扩张约 11~30 km。

结合 2011—2015 年研究区降雨量、地下水超采面积、地下水位埋深资料,探讨近年来莱州湾南岸海水入侵范围变化趋势及其成因,认为降雨量减少、地下水超采、河流拦蓄工程等为莱州湾南岸海水入侵加剧的主要因素。

参考文献:

[1] Tomaszkiwicz M, Najm A M, Fadel, E M. Development of a groundwater quality index for seawater intrusion in coastal aquifers[J]. *Environment Modeling and Software*, 2014, 57: 13-26.

[2] Werner A D. A review of seawater intrusion and its management in Australia[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(1): 281-285.

[3] Shefif M M, Hamza K I. Mitigation of seawater intrusion by pumping brackish water[J]. *Transport Porous Media*, 2001, 43: 29-44.

[4] 赵长荣, 杨吉龙, 肖国强, 等. 大连大魏家水源地海水入侵过程中水文地球化学作用分析及定量模拟[J]. *地质调查与研究*, 2012, 35(2): 155-160.

Zhao Changrong, Yang Jilong, Xiao Guoqiang, et al. Hydrogeochemical reactions and hydrogeological model for sea water intrusion processes in the Daweijia water

source area, Dalian City[J]. *Geological Survey and Research*, 2012, 35(2): 155-160.

[5] 张铭汉, 于洪军, 单秋美. 莱州湾地区海水入侵通道的研究[C]//中国科学院海洋研究所. *海洋科学集刊* (41). 北京: 科学出版社, 1999: 33-39.

Zhang Minghan, Yu Hongjun, Shan Qiumei. Study on seawater intrusion channels in Laizhou Bay region[C]// Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. *Studia Marina Sinica*(41). Beijing: Science Press, 1999: 33-39.

[6] 国家海洋局. 2007 年中国海洋环境质量公报 [EB/OL]. [2010-03-25]. http://www.ml.gov.cn/zwgk/tjxx/201003/t20100325_712650.htm.

State Oceanic Administration, People's Republic of China. *Bulletin of China marine environmental status of 2007*[EB/OL]. [2010-03-25]. http://www.ml.gov.cn/zwgk/tjxx/201003/t20100325_712650.htm.

[7] 刘恩峰, 张祖陆, 沈吉, 等. 莱州湾南岸潍河下游地区咸水入侵灾害成因及特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(3): 78-87.

Liu Enfeng, Zhang Zulu, Shen Ji, et al. Origin and characteristics of salt-water intrusion disaster in the downstream of Weihe River on the south coast of Laizhou Bay[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(3): 78-87.

[8] 毕延凤, 于洪军, 徐兴永, 等. 基于模糊聚类分析的莱州湾南岸地下水化学分布特征研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(4): 361-368.

Bi Yanfeng, Yu Hongjun, Xu Xingyong, et al. Study on the groundwater hydrochemistry distribution features in the souther Laizhou Bay based on the fuzzy cluster analysis[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(4): 361-368.

[9] 杨吉龙, 李红, 施佩歆, 等. 环渤海典型地段海(咸)水入侵研究现状及方法探讨[J]. *地质调查与研究*, 2014, 37(4): 294-299.

Yang Jilong, Li Hong, Shi Peixin, et al. Research status and discussion on the method of seawater intrusion in the key section of Circum-Bohai-Sea Region[J]. *Geology Survey and Research*, 2014, 37(4): 294-299.

[10] 张传奇, 温小虎, 高猛, 等. 莱州湾东岸地下水化学及盐化特征[J]. *海洋通报*, 2014, 33(5): 584-591.

Zhang Chuanqi, Wen Xiaohu, Gao Meng, et al. Hydrochemical characteristics and salinization characteristics of groundwater in the east coast of the Laizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(5): 584-591.

[11] 胡云壮, 李红, 李影, 等. 山东莱州湾南岸典型剖面海(咸)水入侵过程的水文地球化学识别[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(1): 41-50.

Hu Yunzhuang, Li Hong, Li Ying, et al. Hydrogeochemical recognition of seawater intrusion process at

- the typical profile in Laizhou Bay[J]. Geological Survey and Research, 2015, 38(1): 41-50.
- [12] 苗青, 陈广泉, 刘文全. 莱州湾地区海水入侵灾害演化过程及成因[J]. 海岸工程, 2013, 32(2): 69-78.
Miao Qing, Chen Guangquan, Liu Wenquan. Disaster evolution and genesis of seawater intrusion in the Laizhou Bay[J]. Coastal Engineering, 2013, 32(2): 69-78.
- [13] 张祖陆. 鲁北平原浅埋古河道带基本特征[J]. 地理科学, 1990, 10 (4): 372-378.
Zhang Zulu. Elementary characteristics of shallow-buried paleochannels in Lubai Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 1990, 10 (4): 372-378.
- [14] 吴忱. 华北平原古河道研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 64-76.
Wu Chen. The Research of Ancient River on the North China Plain[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991: 64-76.
- [15] 韩有松, 孟广兰, 王少青. 渤海莱州湾滨海平原晚第四纪地质事件与古环境[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(35). 北京: 科学出版社, 1994: 87-98.
Han Yousong, Meng Guanglan, Wang Shaoqing. The geological events and paleo-environment of the coastal plain of Laizhou Bay in Bohai Sea during late Quaternary[C]//Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Studia Marina Sinica(35). Beijing: Science Press, 1994: 87-98.
- [16] 韩非, 薛禹群, 吴吉春, 等. 莱州湾南岸咸水入侵条件下地下水的水化学特征与卤水形成[J]. 地质论评, 2001, 47(1): 102-108.
Han Fei, Xue Yuqun, Wu Jichun, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater in salt-water intrusion condition and genesis of brine along the south coast of the Laizhou Bay, China[J]. Geological Review, 2001, 47(1): 102-108.
- [17] 王珍岩, 孟广兰, 王少青. 渤海莱州湾南岸第四纪地下卤水演化的地球化学模拟[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 49-53.
Wang Zhenyan, Meng Guanglan, Wang Shaoqing. Geochemistry modeling of Quaternary subsurface brines in south coast of the Laizhou Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(1): 49-53.
- [18] 郑懿珉, 高茂生, 刘森, 等. 晚更新世以来莱州湾南岸地下卤水资源分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 11-18.
Zheng Yimin, Gao Maosheng, Liu Sen, et al. Distribution characteristics of subsurface brine resources on the southern coast of Laizhou Bay since late Pleistocene[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 11-18.
- [19] GB 11896-1989, 水质 氯化物的测定硝酸银滴定法[S]. GB 11896-1989, Water quality determination of chloride-silver nitrate titration method[S].
- [20] 中国地质调查局. 城市地质环境问题调查评价规范(DD2008-03)[R]. 北京: 中国地质调查局, 2008.
China Geological Survey. Code for survey of urban environmental geologic problems(DD2008-03)[R]. Beijing: China Geological Survey, 2008.
- [21] 刘冀闽, 师沙沙, 韩涛. 电导率法在海水入侵监测中的应用[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2009, 19(1): 77-82.
Liu Jimin, Shi Shasha, Han Tao. The application of resistivity method in seawater intrusion monitoring[J]. Journal of EMCC, 2009, 19(1): 77-82.
- [22] 崔日鲜. 潍坊市近 56 年气温及降水变化特征分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2012, 29(4): 267-272.
Cui Rixian. Analysis of characteristics of temperature and precipitation change on Weifang City in recent 56 years[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2012, 29(4): 267-272.
- [23] 山东省水利厅. 2013 年 4 月水情月报[R]. 济南: 山东省水利厅, 2013.
Water Resources Department of Shandong Province. Monthly water of April in 2013[R]. Jinan: Water Resources Department of Shandong Province, 2013.
- [24] 国家海洋局. 2015 年中国海洋环境状况公报第 5 章 [EB/OL]. [2017-12-04]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhjzlg/201712/t20171204_59447.html.
State Oceanic Administration, People's Republic of China. Bulletin of China marine environmental status of 2015[EB/OL]. [2017-12-04]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhjzlg/201712/t20171204_59447.html.
- [25] Nair I S, Rajaveni S P, Schneider M, et al. Geochemical and isotopic signatures for the identification of seawater intrusion in an alluvial aquifer[J]. Journal Earth System Science, 2015, 124(6): 1281-1291.
- [26] Abdalla F. Ionic ratios as tracers to assess seawater intrusion and to identify salinity sources in Jazan coastal aquifer, Saudi Arabia[J]. Arab J Geosci, 2016, 9(1): 1-12.
- [27] 郭笃发. 莱州湾东南岸海水入侵区地下水中若干离子的主成分分析[J]. 海洋科学, 2004, 28(9): 6-9.
Guo Dufa. Principal component analysis on the ions in the groundwater intrusion area of Laizhou Bay coast[J]. Marine Sciences, 2004, 28(9): 6-9.
- [28] 卜庆伟, 李福林, 陈学群, 等. 莱州湾东岸海底地下水来源判别及量值估算[J]. 海洋科学, 2013, 37(11): 74-78.
Pu Qingwei, Li Fulin, Chen Xuequn, et al. Identity and quantity of submarine groundwater discharge along the east coast of Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2013, 37(11): 74-78.

- [29] Zhang Shouquan, Dai Fuchu. Isotope and hydrochemical study of seawater intrusion in Lai Zhou Bay, Shandong Province[J]. Science in China Series E, 2001, 44: 86-91.
- [30] 潍坊市水利局. 潍坊市水情年报(2011年—2015年)[R]. 潍坊: 潍坊市水利局, 2011-2015.
Weifang Water Conservation Bureau. Annual report of Weifang water situation (2011-2015)[R]. Weifang: Weifang Water Conservation Bureau, 2011-2015.
- [31] 梁文, 胡自宁, 黎广钊, 等. 50年来北海市滨海湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. 海洋科学, 2016, 2: 84-93.
Liang Wen, Hu Zining, Li Guangzhao, et al. Change and driving mechanism of landscape patterns in the coastal wetland of Beihai City in the last 50 years[J]. Marine Sciences, 2016, 2: 84-93.
- [32] 吴珊珊, 张祖陆, 陈敏, 等. 莱州湾南岸滨海湿地变化及原因分析[J]. 湿地科学, 2009, 7(4): 373-378.
Wu Shanshan, Zhang Zulu, Chen Min, et al. Change of coastal wetlands and analysis of its driving reasons along south coast of the Laizhou Bay[J]. Wetland Science, 2009, 7(4): 373-378.

The trend and influencing factors of seawater intrusion in the south coast of the Laizhou Bay

LIU Ying^{1, 2}, JIANG Xi-ren^{1, 2}, WANG Xing^{1, 2}, LI Bao-lei¹, JIANG Huan-huan¹

(1. North China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation Qingdao 266033, China)

Received: Jan. 11, 2017

Key words: the Laizhou Bay; seawater intrusion; precipitation; groundwater overexploitation

Abstract: This study aims to determine the extent and influencing factors of seawater intrusion in the coastal aquifer of the southern Laizhou Bay. In the recent five years, 15 groundwater samples per year were collected every April and analyzed for total dissolved solids (TDS) and Cl^- content. The results show that the average Cl^- concentration is 13.4 g/L, which rapidly decreases toward the mainland. According to historical data and Kriging interpolation calculation by logarithmic transformation, the salinization of the aquifer exceeded 45 km toward the mainland in 2015 and has expanded almost 30 km inland since 1980. In the comparative analysis, the annual rainfall, groundwater depth, and over extraction of groundwater show significant linear correlation with the seawater intrusion area. The seawater intrusion was mainly aggravated by the continual dry weather and over extraction of groundwater, and was further intensified by the unplanned salt production, aquaculture, and river reservoir.

(本文编辑: 刘珊珊)