

# 海南省海岸带典型区域海水入侵现状评价

杨 坤<sup>1,2</sup>, 刘文全<sup>2,3</sup>, 徐兴永<sup>2,3</sup>, 陈广泉<sup>2,3</sup>, 刘衍君<sup>1</sup>, 付腾飞<sup>2,3</sup>, 王传珺<sup>4</sup>,  
付云霞<sup>5</sup>

(1. 聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 5. 青岛地质工程勘察院, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 基于海南省东部和南部海岸带地区地下水现场监测数据和室内水化学测定数据, 研究了各水化学指标间的相关性, 分析了区域海水入侵现状。研究结果表明地下水中  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$  的变异系数较高, 与矿化度(TDS)具有强的相关性; 以  $m(\text{Cl}^-)$  ( $m$  表示质量浓度) 和 TDS 分别作为评价因子开展了海水入侵现状评价, 结果表明研究区域内地下水未受到海水入侵的影响;  $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 、 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 、 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Na}^+)$ 、 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$ 、钠吸附比(SAR)与  $m(\text{Cl}^-)$  的相关性分析结果表明  $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 、 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Na}^+)$ 、 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$  以及 SAR 4 个参数可以作为海南省海水入侵判定的评价因子。研究结果对建设海南省“国际旅游岛”战略目标, 指导当地合理利用地下水具有参考价值。

**关键词:** 海南省; 地下水; 海水入侵; 离子含量

中图分类号: P641.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)05-0057-07  
DOI: 10.11759/hyxx20181015001

海水入侵是指滨海地带含水层的水动力条件发生改变, 引起地下水位大幅度下降, 海水与淡水之间的水动力平衡被破坏, 导致咸淡水界面向陆地方向移动的现象<sup>[1]</sup>。海水入侵灾害的诱因主要包括气候变化、海面上升和人为超采地下水等自然和人为因素<sup>[2-3]</sup>。海水入侵导致地下水咸化、工业管道和设备腐蚀老化等, 农业因地下水变咸导致土壤盐渍化而大幅减产, 人畜饮用劣质水而导致疾病增加。近年来, 世界上许多国家的沿海地区都受到海水入侵灾害的影响, 如美国、澳大利亚、黎巴嫩和泰国等<sup>[4-7]</sup>。20世纪 60 年代开始, 海水入侵已成为我国海岸带地区面临的主要环境问题之一, 严重阻碍了当地社会-经济-生态的可持续发展以及人民生活水平的提高<sup>[8]</sup>。因此开展海水入侵监测与评价研究, 评估灾害的危害范围和程度对于地方政府制定海水入侵防治对策以及合理利用地下水具有参考价值。

海水入侵监测与评价研究国内外已经开展了很多工作, 取得了较多的科研成果。水化学方法是目前海水入侵现状评价常用的技术方法之一, 该方法基于海水入侵现场监测, 通过采集地下水样, 分析水化学特征, 进而利用不同水化学要素的变化特征对海水入侵特征进行判定。滕金伯采用  $\text{Cl}^-$ 、矿化度(TDS)等

水化学指标对辽宁东部某区域沿海海水入侵时空分布特征进行评价分析<sup>[9]</sup>, 王丹等人在对唐山沿海海水入侵地下水水质评价时, 选取  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  两项化学指标作为综合评价海水入侵的指标<sup>[10]</sup>。刘宏伟等通过对 2010 年在冀东平原采集的 34 组水化学同位素样品进行分析, 探讨了地下水  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Cl}^-$  的关系<sup>[11]</sup>。海南岛地下水资源丰富, 近年来由于人口的不断增加和经济的快速发展, 地下水的抽取使用规模越来越大, 水位有持续下降的趋势, 极易诱发海水入侵的发生。由于各方面条件限制, 关于海南岛海水入侵方面的研究还较少。本文利用海南岛东岸和南岸的地下水现场监测数据及室内水化学测定数据, 运用多种方法对其海水入侵现状进行评价, 综合分析各个方法的有效性, 研究成

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC040280402); 国家自然科学基金(41706068)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2016YFC040280402; National Natural Science Foundation of China, No. 41706068]

作者简介: 杨坤(1994-), 男, 山东泰安人, 硕士, 主要研究方向为微咸水利用, 电话: 18866053610, E-mail: 18866053610@163.com; 刘衍君(1979-), 通信作者, 女, 山东文登人, 硕士, 副教授, 主要从事土壤重金属污染与机理方面的研究, 电话: 13287512798, E-mail: liuyanjun@lcu.edu.cn

果对于海南岛地下水合理利用及防灾减灾政策的制定具有一定的指导意义。

## 1 区域概况

### 1.1 研究区域

海南岛地处热带北缘,属热带季风气候,这里长夏无冬,年平均气温 22~27℃,雨量充沛,年降水量在 1 000~2 600 mm,年平均降水量为 1 639 mm,有明显的多雨季和少雨季。少雨季节干旱常常发生。全岛地下水天然资源总量丰富,多年平均地下水天然补给丰富,开采量充足,地下水的开采潜力较大。海南岛四周低平,中间高耸,以五指山、鹦哥岭为隆起核心,向外围逐级下降。山地、丘陵、台地、平原构成环形层状地貌,梯级结构明显。海南岛地质构造

形态在空间分布上,以各种不同的方向、形迹和性质的构造组合,形成东西向构造、南北向构造、北东向构造、北西向构造等主要构造体系,成为陆地的主要构造格局,控制着岛陆沉积建造、岩浆活动、成矿作用及晚近时期的山川地势的展布。

### 1.2 采样点设计

为客观、全面地反映研究区内海水入侵的范围及程度,在海南岛东部和南部海岸带地区进行了随机取样,保证东部海岸这个总体中的每个区域都有同等机会被抽中,它最大的优点是,再根据样本资料推论总体时,可用概率的方式客观地测量推论值的可靠程度,从而使这种推论建立在科学的基础上。本文共选取了 35 个观测井,采集地下水样,采样时间为 2017 年 10 月,具体站点分布如表 1 所示。

表 1 采样点站位  
Tab. 1 Sampling stations

采样点代码	采样点位置	采样点代码	采样点位置
HK01	110°09'48.05"E, 20°03'04.80"N	SY06	109°34'39.00"E, 18°14'54.00"N
HK02	110°09'38.02"E, 20°03'02.40"N	WN01	110°27'32.00"E, 18°45'49.00"N
HK03	110°10'08.20"E, 20°01'56.60"N	WN02	110°27'19.00"E, 18°46'00.00"N
HK04	110°14'41.05"E, 20°01'36.10"N	WN03	110°25'32.00"E, 18°43'10.00"N
HK06	110°14'54.02"E, 20°01'47.10"N	WN04	110°31'29.00"E, 19°03'11.00"N
HK07	110°22'11.04"E, 20°03'36.40"N	WN05	110°33'53.00"E, 19°04'36.00"N
HK08	110°22'25.07"E, 20°04'24.80"N	BA01	110°34'10.00"E, 19°07'34.00"N
HK09	110°23'50.02"E, 20°03'00.90"N	BA02	110°34'20.00"E, 19°07'44.00"N
HK10	110°26'07.50"E, 20°02'14.30"N	WC01	110°39'59.00"E, 19°22'10.00"N
HK11	110°27'11.08"E, 20°02'14.80"N	WC02	110°42'27.00"E, 19°25'12.00"N
HK12	110°31'56.09"E, 20°00'00.85"N	WC03	110°54'35.00"E, 19°35'06.00"N
HK13	110°18'29.06"E, 19°59'54.70"N	WC04	110°53'56.00"E, 19°34'49.00"N
HK14	110°19'26.09"E, 20°01'10.90"N	WC05	110°58'06.00"E, 19°38'02.00"N
HK15	110°20'10.04"E, 20°00'27.80"N	WC06	110°58'02.00"E, 19°37'52.00"N
SY01	109°45'45.05"E, 18°24'25.90"N	WC08	110°58'09.00"E, 19°51'49.00"N
SY02	109°45'47.36"E, 18°23'43.12"N	WC09	110°56'38.00"E, 19°58'52.00"N
SY03	109°45'47.37"E, 18°23'43.13"N	WC10	110°50'08.00"E, 19°59'02.00"N
SY05	109°34'34.00"E, 18°14'52.00"N		

### 1.3 样品分析与数据处理

现场采集水样均储存于 500 mL 高密度聚乙烯瓶中,样品分析内容及方法为: TDS 采用残渣烘干质量法测定,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子的浓度通过 IC-2800 离子色谱仪测定,  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的浓度通过双指示剂法测定<sup>[12]</sup>。

利用 SPSS19.0 软件对地下水水化学参数进行描述性统计分析;利用 Grapher9.0 软件绘制各化学指

标与  $\text{Cl}^-$  的质量浓度  $m(\text{Cl}^-)$  的相关性图,结合有关资料,全面系统地研究海南省典型海岸带的地下水特征,揭示海水入侵的现状。

## 2 结果与分析

### 2.1 各水化学指标的描述性统计分析

地下水各水化学指标统计特征见表 2。从表 2 可见,研究区浅层地下水属于重碳酸盐-钠镁水-A。其中,

Cl<sup>-</sup>的质量浓度  $m(\text{Cl}^-)$  介于 0.40~5 420 mg/L、 $m(\text{Na}^+)$  在 7.88~2 644 mg/L、TDS 在 62.00~11 986.00 mg/L、 $m(\text{K}^+)$  在 1.69~145.05 mg/L、 $m(\text{Mg}^{2+})$  在 3.42~45.36 mg/L、 $m(\text{Ca}^{2+})$  在 1.69~443.10 mg/L、 $m(\text{SO}_4^{2-})$  在 1.64~588.70 mg/L、 $m(\text{HCO}_3^-)$  在 9.77~1026.37 mg/L、 $m(\text{CO}_3^{2-})$  在 3.20~6.41 mg/L。从离子质量浓度均值上看阴离子

中  $m(\text{Cl}^-)$  以及阳离子中的  $m(\text{Na}^+)$  占有绝对优势。但是在阴离子中  $m(\text{HCO}_3^-)$  的平均值大于阳离子中质量浓度最大值。并且  $m(\text{Cl}^-)$  以及  $m(\text{Na}^+)$  的变异系数较大, 分别达到 4.6 和 3.88, 而  $m(\text{HCO}_3^-)$  的变异系数相对较小, 说明  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  受到自然和人类活动等外界环境更为敏感脆弱,  $\text{HCO}_3^-$  比较稳定。

表 2 地下水水质分析结果

Tab. 2 Results of groundwater quality analysis

水质检测指标	水质检测指标质量浓度/(mg/L)			标准偏差	变异系数
	最大值	最小值	平均值		
$m(\text{Na}^+)$	2 644.00	7.88	114.67	444.42	3.88
$m(\text{K}^+)$	145.05	1.69	12.91	24.54	1.90
$m(\text{Mg}^{2+})$	198.90	3.42	45.36	38.75	0.85
$m(\text{Ca}^{2+})$	443.10	1.69	45.10	87.03	1.93
$m(\text{Cl}^-)$	5 420.00	0.40	198.58	909.49	4.60
$m(\text{SO}_4^{2-})$	588.70	1.64	70.44	129.79	1.84
$m(\text{HCO}_3^-)$	1 026.37	9.77	233.87	206.62	0.88
$m(\text{CO}_3^{2-})$	6.41	3.20	4.80	2.26	0.47
TDS	11 986.00	62.00	778.09	1961.01	2.52

## 2.2 $m(\text{Cl}^-)$ 与 TDS 相关性分析

海水入侵导致地下含水层水质恶化, 最明显的变化是水中  $m(\text{Cl}^-)$  和 TDS 的增高, 所以通常以  $m(\text{Cl}^-)$  和 TDS 为指标来判断海水是否入侵及入侵的范围和等级。由于不同地区的环境不同, 所以在天然地下水中  $m(\text{Cl}^-)$  的背景值是不同的, 所以不同地区判别的标准也是不一样的。TDS 是指水中所含各种离子、分子及化合物的总量, 是地下水化学成分的重要标志<sup>[14]</sup>, 也同  $\text{Cl}^-$  具有相同的属性即不同地区具有不同的背景值。综合研究区的总体概况和相关标准本文根据(表 3)划分海水入侵等级。

表 3 海水入侵水化学观测指标与入侵程度等级划分<sup>[13]</sup>

Tab. 3 Hydrochemical observation index and invasion degree classification of seawater intrusion

分级	$m(\text{Cl}^-)$ /(mg/L)	TDS/(mg/L)	入侵程度	水质范围
I	<250	<1000	无入侵	淡水
II	250~1000	1000~3000	轻度入侵	微咸水
III	>1000	>3000	严重入侵	咸水

从海南的 35 个站点的地下水的  $m(\text{Cl}^-)$  和 TDS 可以发现, 全区域内的大部分地下水  $m(\text{Cl}^-)$  小于 250.0 mg/L, 只有 SY05 站点的  $m(\text{Cl}^-)$  是 5 420 mg/L, 表明 SY05 站点地下水受到了海水的严重入侵; 分析地下水的

TDS 可以发现同样的规律, 全区域内的大部分地下水 TDS<1 000 mg/L, 没有受到海水入侵的影响, 只有 SY05 站点的 TDS 是 11 986 mg/L, 表明 SY05 站点地下水受到了海水的严重入侵。根据图 1 可以得出地下水的  $m(\text{Cl}^-)$  与 TDS 具有强的相关性, TDS 会随  $m(\text{Cl}^-)$  变化而发生变化。

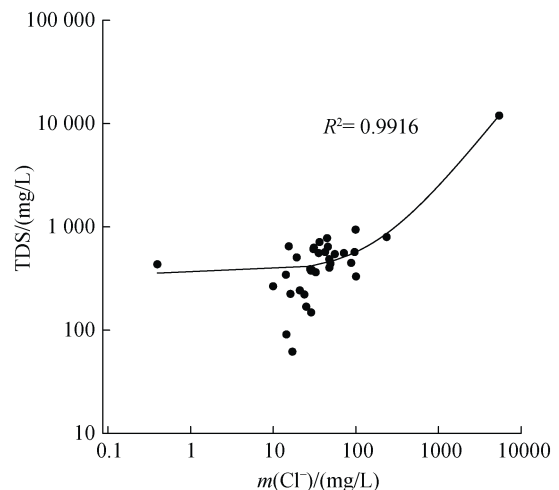


图 1 TDS 与  $m(\text{Cl}^-)$  的相关性图

Fig. 1 Correlation diagram of total dissolved solids (TDS) and  $m(\text{Cl}^-)$

样品中的 SY05 取样点的样品之所以会出现高  $m(\text{Cl}^-)$  以及高 TDS, 是因为站点 SY05 所处的地带是

位于一个卤水厂附近,受到了人类活动的影响,所以SY05站点的 $m(\text{Cl}^-)$ 和TDS都比较高,与其他取样点的数据极具很大的差别。海水入侵现状分析:一个区域受到海水入侵影响,必须是地下水与海水之间发生了一定条件下的联系,发生这种联系的前提是海水与地下水之间通过一些水文地质条件形成联系。海南岛地理位置特殊,水文地质条件复杂,海水入侵一般发生在岛体裂隙比较多,海岸带沉积物松散,海水易于渗透<sup>[15]</sup>。例如站点SY05受到人为因素影响, $m(\text{Cl}^-)$ 以及TDS比较大。在海水入侵的过程中,除了 $m(\text{Cl}^-)$ 和TDS会发生变化外,地下水中的各离子质量浓度比值也会相应地发生变化,可以用来指示海水入侵<sup>[9]</sup>。

### 2.3 各离子质量浓度比值与 $m(\text{Cl}^-)$ 相关分析

在海水中, $m(\text{Na}^+)$ 和 $m(\text{Cl}^-)$ 一般是相对稳定的,其离子质量浓度比值 $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 约为0.86,不同的海域其波动值在2%以内<sup>[16]</sup>。利用 $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 可以来指示海水入侵,当这个比值小于0.86时表示地下水可能受到了海水入侵的影响,而这个比值大于1则表示有受到人类活动污染的影响。从图2中可以看出除了一点特殊外,其余站点的 $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 都在0.4~5.1,其中一个点出现较高的值是由于这一点的 $m(\text{Cl}^-)$ 比较低,地下水中的钠离子几乎没有变化,所以导致 $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 比较高。区域内83%样品的 $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ ,在 $m(\text{Cl}^-)$ 小于250 mg/L的范围内没有明显的变化,说明 $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 是非常稳定的,指示了此区域内的海水入侵现状是可观的并没有受到海水入侵的影响。

海水中的主要阴离子是 $\text{Cl}^-$ ,而沿岸的地下淡水中的主要阴离子是 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ ,海水与淡水中的 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 的值相差若干个数量级,不同程度的海水入侵会使淡水中 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 和 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{SO}_4^{2-})$ 发生明显的变化。因此, $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 是判断和区分海水入侵程度十分有效的指标之一。

从图2可以看出 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 的点分布的相对分散,利用 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 范围分析,结果表明有27个地下水样的 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 小于0.5表示未受到海水入侵的影响,有8个地下水样的 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 介于0.5~5.5,主要是由于这8个地下水样的 $m(\text{HCO}_3^-)$ 偏低造成了 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 较大,所以不存在海水入侵的现象。

图2为 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{SO}_4^{2-})$ 的相关图,从图中可以看

出点分布相对分散, $m(\text{Cl}^-)/m(\text{SO}_4^{2-})$ 出现了2个高点,这2个点主要是因为地下水中的 $m(\text{SO}_4^{2-})$ 过低造成的。在地下水中, $\text{SO}_4^{2-}$ 分布受到地质作用的影响,地质作用不同造成了地下水的环境不同,离子的分布就会受到一定的影响,造成离子分布不均。离子的区域分布不均也说明 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ 和 $m(\text{Cl}^-)/m(\text{SO}_4^{2-})$ 不适合对该区域的海水入侵的评价。

在海水入侵地下水的过程中,离子之间的交替吸附作用会使某些阳离子被岩土颗粒表面所带的负电荷吸附,同时将原来吸附在岩土颗粒表面的部分阳离子溶解,转为地下水组分,这对表征海水入侵的程度和解释各种离子之间的比值变化具有重要意义。当淡水被海水入侵取代时, $\text{Na}^+$ 会被岩石表面所吸附,原本吸附在岩石表面的 $\text{Ca}^{2+}$ 和部分的 $\text{Mg}^{2+}$ 会释放到水中。因此, $m(\text{Ca}^{2+})$ 的升高也可用来指征海水入侵。

根据图2分析得出,83%的 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Na}^+)$ 是小于1的;只有一个点的 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Na}^+)$ 大于6,并且这个点的 $m(\text{Cl}^-)$ 只有9.96 g/L,说明了此区域内地下水中的离子之间复杂的交换关系,说明 $m(\text{Ca}^{2+})$ 和 $m(\text{Na}^+)$ 之间的减缓关系受到其他离子的影响。

对于图2中 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$ ,57%的 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$ 是小于1的,40%的 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$ 是1~5。通过分析得出,这个区域内几乎没有形成 $\text{Ca}^{2+}$ 的富集,质量浓度也因此没有明显增加,所以此区域几乎没有受到海水入侵的影响。

### 2.4 SAR与 $m(\text{Cl}^-)$ 相关性分析

$\text{Na}^+$ 是海水中主要的阳离子,其含量比陆地地下水淡水高出了2~4个数量级, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 是陆地地下水中主要阳离子。钠吸附比(SAR)是从阳离子角度来评价海水入侵程度,其表达式为:

$$\text{SAR} = \frac{m(\text{Na}^+)}{\sqrt{\frac{1}{2}(m(\text{Ca}^{2+}) + m(\text{Mg}^{2+}))}} \quad (1)$$

地下水样本海水入侵指标SAR与 $m(\text{Cl}^-)$ 强相关性,从表的比对中我们可以看出SAR的值出现峰值时,此时 $m(\text{Cl}^-)$ 也出现了峰值,并且除峰值之外的其他样品点的SAR变化幅度很小,比较稳点,正好与 $m(\text{Cl}^-)$ 的变化趋势相符。 $m(\text{Cl}^-)$ 代表了整体地下水中的阴离子的变化趋势,SAR代表了地下水中阳离子的变化趋势以及它们的空间含量,从地下水中的阴、阳离子的变化趋势以及他们的空间分布来判断区域

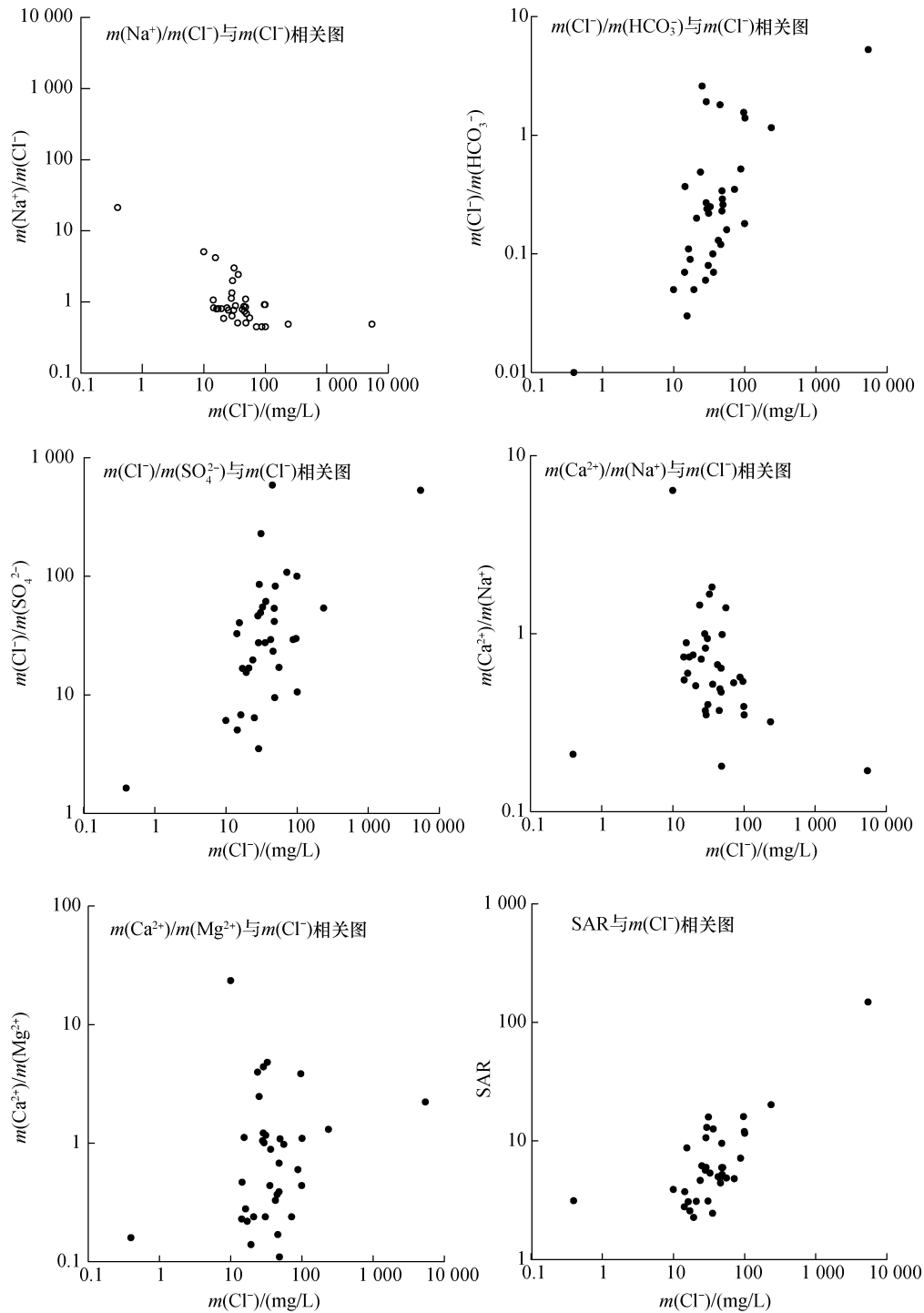


图 2 地下水化学离子比值与  $m(\text{Cl}^-)$  相关图

Fig. 2 Correlation diagram of groundwater chemical ion ratio and  $m(\text{Cl}^-)$

内是否具有海水入侵的现象，相对而言是一种比较科学便捷的方法。从图 2 中 SAR 的数据，可以得到除了对应的 SY05 站点的样品受到人类活动的影响受到海水入侵之外，其他站点显示并未受到海水入侵的影响。

### 3 结论

(1) 海南省东部地下水除了 SY05 站点属于严重海水入侵外，其他地区基本没有受到海水入侵的影响，地下水  $m(\text{Cl}^-)$  和 TDS 没有超过海水入侵阈值；

研究区  $m(\text{Cl}^-)$  与 TDS 有弱的相关性,  $m(\text{Cl}^-)$  与  $m(\text{Na}^+)$  的变异系数较高, 受外界自然因素和人为因素影响明显, 能够较好地反映外界环境的变化特征。

(2)  $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ 、 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Na}^+)$ 、 $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$  以及 SAR 四个指标能在一定程度上充当海水入侵判定的依据, 弥补  $m(\text{Cl}^-)$  和 TDS 作为单一指标因子来判断海水入侵发生与否的误差与不足, 对于区域研究海水入侵具有积极的作用。

参考文献:

- [1] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15.  
Guo Zhanrong, Huang Yipu. Overview of research on seawater intrusion[J]. Hydrology, 2003, 23(3): 10-15.
- [2] 杜国云. 莱州湾东岸动力地貌对陆海相互作用的响应研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 70-75.  
Du Guoyun. Dynamic geomorphological response to land-sea interaction on the eastern coast, Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2016, 40(8): 70-75.
- [3] 黄洪城, 匡翠萍, 顾杰, 等. 河口咸潮入侵研究进展[J]. 海洋科学, 2014, 38(9): 109-115.  
Huang Hongcheng, Kuang Cuiping, Gu Jie, et al. Research development in estuarine saltwater intrusion[J]. Marine Sciences, 2014, 38(9): 109-115.
- [4] Barlow P M, Reichard E G. Saltwater intrusion in coastal regions of North America[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(1): 247-260.
- [5] Werner A D. A review of seawater intrusion and its management in Australia[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(1): 281-285.
- [6] Moujabber M E, Samra B, Darwish T, et al. Comparison of different indicators for groundwater contamination by seawater intrusion on the Lebanese Coast[J]. Water Resources Management, 2006, 20(2): 161-180.
- [7] 刘杜娟. 中国沿海地区海水入侵现状与分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(1): 31-37.  
Liu Dujuan. Status and analysis of seawater intrusion in China's coastal areas[J]. Geological Disasters and Environmental Protection, 2004, 15(1): 31-37.
- [8] 苗青. 降雨与潮汐作用对莱州湾地区海水入侵的影响机制研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013.  
Miao Qing. Effects of precipitation and tide on seawater intrusion in Laizhou Bay[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2013.
- [9] 滕金伯. 基于水化学方法的辽东沿海海水入侵时空分布特征评价研究[J]. 水利规划与设计, 2017, 37(4): 52-56.  
Teng Jinbo. Evaluation study on the spatial and temporal distribution characteristics of coastal seawater intrusion in eastern Liaoning based on hydrochemical methods[J]. Water Planning and Design, 2017, 37(4): 52-56.
- [10] 王丹, 陶志刚, 牵昌存. 唐山沿海海水入侵地下水水质评价[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(6): 10-14.  
Wang Dan, Tao Zhigang, Qian Changcun. Evaluation of groundwater quality of coastal seawater intrusion in tangshan[J]. Marine Geological Dynamics, 2006, 22(6): 10-14.
- [11] 刘宏伟, 杨君, 杜东, 等. 冀东平原滨海地区浅层地下水水化学与同位素特征分析[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(2): 108-114.  
Liu Hongwei, Yang Jun, Du Dong, et al. Analysis of hydrochemistry and isotopic characteristics of shallow groundwater in the coastal area of eastern Hebei plain[J]. Geological Survey and Research, 2014, 37(2): 108-114.
- [12] 曹建荣, 徐兴永, 于洪军, 等. 黄河三角洲浅层地下水化学特征与演化[J]. 海洋科学, 2014, 38(12): 78-85.  
Cao Jianrong, Xu Xingyong, Yu Hongjun, et al. Chemical characteristics and evolution of shallow groundwater in the Yellow River delta[J]. Marine Sciences, 2014, 38(12): 78-85.
- [13] 李福林. 莱州湾东岸滨海平原海水入侵的动态监测与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.  
Li Fulin. Dynamic monitoring and numerical simulation of seawater intrusion in the coastal plain on the east coast of Laizhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [14] 孙宗勋, 陈军, 谢强, 等. 珠江口西岸海水入侵现状调查分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 81-84.  
Sun Zongxun, Chen Jun, Xie Qiang, et al. Investigation and analysis of the current situation of seawater intrusion in the west bank of the Pearl River estuary[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(8): 81-84.
- [15] 高伟, 李萍, 傅命佐, 等. 海南省典型海岛地质灾害特征及发展趋势[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(2): 59-65.  
Gao Wei, Li Ping, Fu Mingzuo, et al. Characteristics and development trend of typical island geological disasters in Hainan province[J]. Marine Development and Management, 2014, 31(2): 59-65.
- [16] Maeller D. The Na/Cl ratio in rainwater and the seasalt chloride cycle [J]. Tellus, 1990, 42(3): 254-262.

# Evaluation of seawater intrusion in typical coastal zones of Hainan Province

YANG Kun<sup>1, 2</sup>, LIU Wen-quan<sup>2, 3</sup>, XU Xing-yong<sup>2, 3</sup>, CHEN Guang-quan<sup>2, 3</sup>,  
LIU Yan-jun<sup>1</sup>, FU Teng-fei<sup>2, 3</sup>, WANG Chuan-jun<sup>4</sup>, FU Yun-xia<sup>5</sup>

(1. College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. First institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. State Oceanic Administration Key Laboratory of Marine Sedimentation and Environmental Geology, Qingdao 266061, China; 4. National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China; 5. Qingdao Geological Engineering Investigation Institute, Qingdao 266071, China)

**Received:** Oct. 15, 2018

**Key words:** Hainan Province; groundwater; seawater intrusion; ion content

**Abstract:** Based on the field monitoring and indoor water chemistry measurement data from the coastal areas of eastern and southern Hainan Province, this paper studied the correlation among various water chemistry indexes and analyzed current regional seawater intrusion. The results showed that the variation coefficient of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  in groundwater was high and correlated strongly with total dissolved solids (TDS). The current evaluation of seawater intrusion was conducted using  $m(\text{Cl}^-)$  ( $m$  is mass concentration) and TDS as evaluating factors. Results showed that inland water was unaffected by seawater intrusion. The correlation analysis results of  $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ ,  $m(\text{Cl}^-)/m(\text{HCO}_3^-)$ ,  $m(\text{Cl}^-)/m(\text{SO}_4^{2-})$ ,  $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Na}^+)$ ,  $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$ , sodium adsorption ratio (SAR), and  $m(\text{Cl}^-)$  showed that the four parameters of  $m(\text{Na}^+)/m(\text{Cl}^-)$ ,  $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Na}^+)$ ,  $m(\text{Ca}^{2+})/m(\text{Mg}^{2+})$ , and SAR could be used to evaluate seawater intrusion in Hainan province. These results have reference value in the strategic goal for construction of a Hainan “international tourism island” and rational utilization of local groundwater.

(本文编辑: 刘珊珊)