

# 环渤海典型地段海(咸)水入侵研究现状及方法探讨

杨吉龙<sup>1</sup>,李红<sup>1</sup>,施佩歆<sup>1</sup>,胡自远<sup>2</sup>,胡云壮<sup>1</sup>,胥勤勉<sup>1</sup>,杜东<sup>1</sup>,孟利山<sup>1</sup>

(1.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170; 2.山东省第七地质矿产勘查院,山东临沂 276000)

**摘要:**通过对大连大魏家、秦皇岛枣园和莱州湾南岸海水入侵的调查,结合已有研究成果和方法,笔者总结和梳理了环渤海地区海水入侵研究现状及存在的问题,并探讨了海水入侵调查研究技术方法。多年来对环渤海地区海水入侵的调查研究工作,基本查清了不同地段、不同类型海水入侵的机理和动态变化趋势,并为海水入侵有效防治提供了科学依据。随着海水入侵问题研究的深入,发现在水文地质条件、地下水动态监测及海水入侵对生态环境影响等方面仍存在问题,应持续加强海水入侵监测与研究。海水入侵调查研究是一项涉及多学科的综合技术,应从基础调查、综合分析、动态监测和数值模拟等多方面开展研究。综合运用水化学分析、同位素示踪、室内模拟试验等技术方法,在充分揭示海水入侵机理和过渡带溶质运移规律的基础上,实现对海水入侵变化趋势的预测预报,提高对海水入侵的防范意识。

**关键词:**环渤海;海(咸)水入侵;背景调查;研究方法

**中图分类号:** P694

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-4135(2014)04-0294-06

当前,世界上44%的人口居住在海岸带地区<sup>[1]</sup>。中国拥有18 000 km的海岸线,按海岸的形态和成因,具有淤泥质海岸线4301 km,砂质海岸线2815 km,基岩海岸线2830 km,其他岸线8054 km<sup>[2]</sup>。我国13亿人口中,超过60%的人居住在沿海的14个省份<sup>[3]</sup>。滨海地区持续超采地下水,造成了地下水位不断下降,破坏了咸淡水平衡,导致海水入侵<sup>[4,5]</sup>。我国海水入侵首先于1964年在大连发现,紧随其后,1970年青岛市也出现海水入侵问题。而大部分城市的海水入侵出现在20世纪70年代后期及80年代初期之后。到目前为止,中国沿海地区发生海水入侵的城市有十几座<sup>[6]</sup>。海水进入地下含水层中,使得地下水矿化度不断升高,最终引起当地地下淡水资源被污染,不能利用,并且会严重影响到地表生态<sup>[7,8]</sup>。出于对地下水资源的保护和地质环境信息的需求,有必要对海水入侵形成的水文地质条件、水动力条件以及海水入侵过程中发生的水化学作用进行研究,并以此为基础,逐步实现海水入侵的预测预警,防范此类地质灾害的发生或恶化。

环渤海地区淡水资源比较匮乏,区内人均水资源量仅为660 m<sup>3</sup>,为全国平均数的23.6%,是我国水资源短缺最严重的地区之一<sup>[9]</sup>。地下淡水资源是环

渤海地区居民饮用水及工农业用水的重要组成部分,为了保障淡水资源供给,多城市在滨海地区建立了供水水源地,较为典型的有1969年建成的大连大魏家岩溶水源地、1959年建成的秦皇岛枣园第四系松散岩类-基岩裂隙水源地,而莱州湾南岸普遍开采第四系松散含水层中的地下淡水作为工农业用水。由于这些水源地特殊的地理位置及地下水持续超量开采,海水与地下淡水原有的水力平衡被打破,诱发了海水入侵。大魏家水源地自20世纪70年代中期逐渐出现了海水入侵,秦皇岛枣园水源地自80年代初出现海水入侵,莱州湾沿岸自1976年开始发现水质变咸,80年代中后期入侵速率增大。以上三个地段水文地质条件分别代表了岩溶裂隙介质、基岩裂隙和松散孔隙双重介质、松散孔隙单一介质含水系统,在这些介质中发生的海水入侵具有一定的典型性,多年来很多地质工作者对其进行了大量的研究工作,从不同角度做了系统研究和总结,取得了一大批研究成果。为了进一步揭示环渤海地区海水入侵机理和掌握海水入侵趋势,本课题组自2005年开始对大连大魏家、秦皇岛枣园和莱州湾南岸这三个地段的海水入侵开展了详细的野外调查和室内研究。本文拟在前人研究的基础上,结合本次调查和研究成果,梳理和探讨海水入侵

收稿日期: 2014-07-24

基金项目: 国家地质大调查项目:环渤海地区重点地段环境地质调查及脆弱性评价(1212010540501)

作者简介: 杨吉龙(1980-),男,助理研究员,主要从事水文地质和工程地质研究,E-mail:jilong.y@163.com。

研究技术方法及注意的问题,以期为以后开展类似的研究工作提供参考。

## 1 海水入侵研究现状及存在的问题

### 1.1 大连大魏家海水入侵研究现状及存在的问题

目前,对松散孔隙介质中海水入侵的研究比较成熟<sup>[5]</sup>,相比之下,裂隙岩溶介质中的海水入侵研究程度相对较低。对大魏家海水入侵的大规模研究主要在20世纪90年代,研究重点是海水入侵机理及岩溶地下水开发和岩溶地下水系统管理模型<sup>[10,11]</sup>,同时还评价了海水入侵对陆地生态环境的影响<sup>[12]</sup>。研究认为大魏家地区海水入侵的水动力因素主要是气候干旱和地下水超采导致的水位下降,入侵方式多种,主要是沿非均质岩溶裂隙入侵、沿构造断裂入侵和沿浅部松散均质含水层的面状入侵。进入21世纪,对大魏家海水入侵过程中的水文地球化学作用进行了水-岩作用室内模拟实验和野外调查研究,并用 $^{18}\text{O}$ 和 $^2\text{H}$ 、 $^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}$ 和 $^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 等同位素示踪了海水入侵过程中可能发生的水文地球化学作用,研究发现海水与淡水的混合作用是以机械混合为主,在此基础上发生了复杂水文地球化学作用<sup>[13,14]</sup>。过渡带混合咸水与岩溶空间内的松散沉积物间的各种离子交换作用主要是阳离子交换吸附,过渡带混合咸水对碳酸盐岩介质的溶蚀作用较为明显,岩溶发育的部位混合溶蚀作用亦最强。以上这些研究成果有效指导了大魏家海水入侵防治并取得了较好的成效。通过近些年的调查研究发现,尽管大魏家水源地开采量减少,水位逐年回升,但在含水层中形成的混合咸水体并没有被明显挤出含水层,部分地段氯离子浓度和矿化度仍然很高,原因尚不清楚。同时,海水入侵监测时间短,没有形成长周期的监测序列,未能有效揭示海水入侵变化规律,给数值模拟预测带来困难,因此要加强海水入侵监测力度。

### 1.2 秦皇岛枣园海水入侵研究现状及存在的问题

秦皇岛海岸线大部分是砂质海岸,少部分为基岩海岸,平原区还存在上部为松散介质和下部为基岩的双重介质海岸。除基岩海岸外,沿海均有不同程度的海水入侵现象。枣园水源地所在的洋河-戴河滨海平原是秦皇岛海水入侵研究最为典型的地段之一,从上世纪80年代以来,对洋河-戴河滨海平原海水入侵的形成与分布、成因机理、数值预测与防治进行了大量的调查研究<sup>[15-20]</sup>。研究得出洋河-戴河滨海平原海水入侵主要是由于集中式过量开采地下

水,形成区域地下水位降落漏斗导致的。本区海水入侵类型主要有沿第四系松散含水层海水入侵、河口海水入侵和沿断裂带海水入侵三种类型,其中含水层海水入侵最为普遍,沿断裂带海水入侵易形成优先入侵通道。在水文地球化学研究方面,韩再生等<sup>[15]</sup>首先分析了洋河-戴河滨海平原海水入侵区地下水化学类型分布并探讨了海水入侵成因。本次工作基于不同水体水化学特征和矿物饱和状态,讨论了本区主要的水文地球化学作用,认为河水和浅层淡水盐分主要来源于岩土风化-溶滤作用,并受到了蒸发浓缩作用的影响;混合咸水的形成主要受浅层淡水与海水的混合作用和浅层淡水蒸发浓缩作用控制,混合过程中还会发生石膏、白云石和方解石等矿物的溶解和沉淀;局地地下水咸化可能受到了深部地下热水的溢流补给<sup>[20]</sup>。对洋河-戴河滨海平原海水入侵的数值预测,先后采用了多种数值预测方法,从海水入侵区的水动力场和浓度场的二维有限单元数值模拟发展到了空间渗流场和溶质运移场的三维有限单元数值模拟<sup>[16,18]</sup>。对比预测后海水入侵的实际发展趋势,数值预测的大趋势和实际发展趋势较为吻合,但预测的定量化精度还显得不足,究其原因可能存三个方面,一是水文地质条件不是十分清楚,精度不够;二是水质和水位的监测还不系统;三是由于自然因素和人为因素的影响,实际情况发生了较大的变异。随着秦皇岛海水入侵问题的深入,研究也显现出不少未解决的问题:地热水体分布状况及对地下水咸化的影响;潮汐的波动变化对带状和面状海水入侵程度的影响;洋河-戴河滨海平原西部由于地下水强采造成的大范围降水漏斗,已经造成海水入侵形势逐渐恶化,对动态变化趋势和形成机理应跟踪监测和研究。

### 1.3 莱州湾海水入侵研究现状及存在的问题

莱州湾沿岸是我国海(咸)水入侵最为典型的地区之一,海岸线大部分为砂质、淤泥质海岸类型,海(咸)水入侵主要发生在第四纪松散堆积物形成的含水层中。莱州湾沿岸海(咸)水入侵是我国迄今研究程度最高的地区<sup>[21]</sup>。长期以来从卤水的成因与分布、海(咸)水入侵的水动力条件与水文地质条件、水文地球化学研究和数值预测方面做了详细的研究。晚更新世以来的三次海侵和古气候冷暖交替是莱州湾南岸卤水形成的主要原因<sup>[22-24]</sup>。莱州湾南岸由于地下水超采形成的多个大范围的地下水位降落漏斗,

同样包括开采卤水形成的漏斗,为海(咸)水入侵提供了水动力条件<sup>[5,25,26]</sup>,区域上形成的古河道、导水断裂、面状分布的砂层,提供了海(咸)水入侵的水文地质条件。水文地质条件决定了莱州湾南岸海(咸)水入侵通道存在多样化,沿层状堆积的冲洪积物顺层侵入是主要方式,此外断裂带的发育及古河道的发育也成为海(咸)水入侵的通道。由于海(咸)水入侵,导致莱州湾南岸地下水化学类型的分带性,由南往北地下水化学类型为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型—HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>·Cl<sup>-</sup>型—Cl<sup>-</sup>·SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>型—Cl<sup>-</sup>型,矿化度从0.2 g/L增加到220 g/L。地下卤水矿化度介于100~220 g/L,为Na-Cl型和Na-Mg-Cl型水,水化学总体特征与海水一致,导致混合咸水的盐分来自于卤水还是现代海水,较难判别。莱州湾南岸海(咸)水入侵过程最为明显的水文地球化学作用亦是阳离子交换(Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>-Ca<sup>2+</sup>),饱和指数的计算表明方解石、白云石基本都处于饱和状态,而石膏和岩盐仍有溶解空间,石膏在矿化度达100 g/L之后才开始缓慢沉淀<sup>[5,27,28]</sup>。本次研究认为莱州湾南岸海(咸)水入侵的调查研究工作重复性

大,突破性少,今后的工作应侧重于水文地质条件和卤水资源赋存状况的调查,在此基础上,有效识别海水入侵和咸水入侵;建立系统的海(咸)水入侵监测网络,分层监测不同水体的动态变化,并建立数值模型,预测海水入侵变化趋势;此外,应加强地下水水位逐渐恢复过程中,地下咸水体的运移规律及对土壤的影响研究。

## 2 海水入侵研究技术方法探讨

海水入侵研究是一个涉及多学科、且综合性很强的课题,应从基础调查,综合分析、动态监测和数值模拟等多方面开展研究,在充分揭示海水入侵机理和过渡带溶质运移规律的基础上,提供可靠的海水入侵防控方案(图1)。

### 2.1 基础调查

诱发海水入侵的因素通常包括自然因素和人为因素,自然方面的原因主要是水文地质条件和气候变化,水文地质条件的调查是研究海水入侵的基础条件,滨海地区地下淡水与海水之间存在的水力联

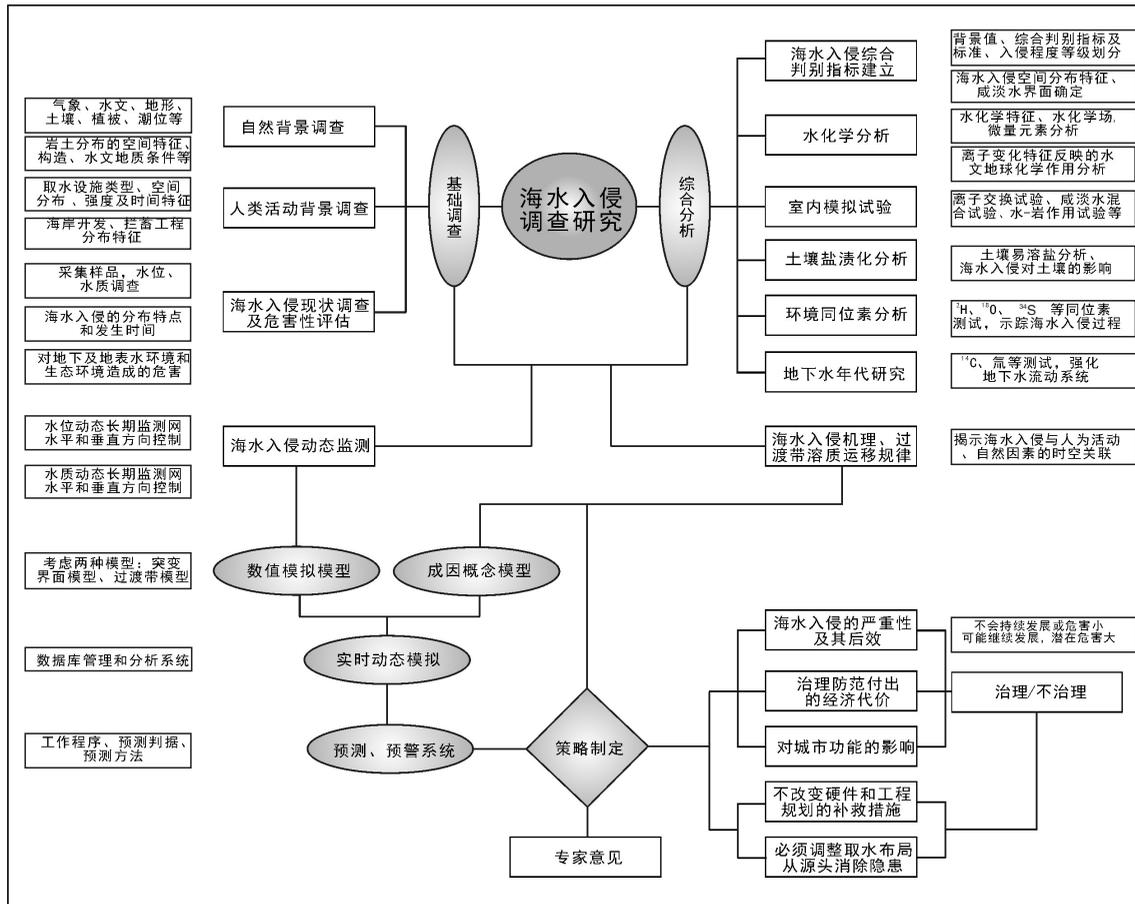


图1 海水入侵调查研究技术方法总图

Fig.1 Techniques summary for investigation and research of the seawater intrusion

系是海水入侵的物质基础。滨海地区第四系存在的颗粒较粗的砂质沉积物、基岩地区发育的裂隙或溶洞及断裂构造等,是海水入侵的主要通道,当陆地地下水水位下降到海平面以下时,海水通过这些通道迅速向内陆入侵。地形地貌通常指示了沉积环境和地下水径流特征,在平原区大量开采地下水易形成地下水水位降落漏斗,引发海水入侵。气候方面的原因是海水入侵的背景条件,气候持续干旱,河水径流量不断减少甚至断流,地下水补给量减少,造成地下水水位普遍下降,严重时也易引发海水入侵。全球气候变暖引起的海平面上升可增大潮水沿河流的上溯距离,结果也可诱发海水入侵。

不合理的人类活动是海水入侵的诱发条件。环渤海地区发生海水入侵的主要因素是长期超量开采地下水,因此对取水设施的类型、空间分布特征、取水强度和开采历史的调查研究至关重要。此外,在入海河流的上游地区修建水库、塘坝等水利设施,均可使河流入海水量普遍减少,或在河口地区大量挖沙降低河床标高等人为活动加剧了潮水上溯的距离,使河流两侧发生海水入侵。

基于以上工作基础,对海水入侵发生区不同的水体,不同层位的地下水,开展系统网络式布点、采样与调查。野外工作主要包括采样点位调查(井位、井深、取水层位、水位埋深等)、原水物理化学参数现场监测和水化学、环境同位素、 $^{14}\text{C}$ 、氡及土壤样品采集等。对所采水样进行快速离子成分分析,可以初步判断工作区海水入侵的现状,宏观上确定海水入侵的空间分布特征。同时对地表生态系统进行调查,掌握地表农作物分布和产能情况等。

海水入侵是一个动态变化的过程,对其进行动态监测研究,不仅可以判断海水入侵危害的程度,而且可以预测海水入侵发展变化的趋势。对海水入侵的监测既要设置长期动态观测点,还要进行丰水期、枯水期大面积的地下水动态普测,形成网络式监测。监测网的布设既要考虑平面上的分带性控制,也要考虑垂线上的分层性控制,建成立体式监测网络。监测要同时兼顾水质和水位的变化,目前,水质监测指标常用的是氯离子和矿化度。

## 2.2 综合分析

### 2.2.1 海水入侵判别等级指标体系建立

背景值的确定以及其能否反映该地区的地下水特征是判定海水入侵是否发生的关键因素,是研究海水入侵的重要步骤之一。各地天然地下水中氯离子

背景值差异很大,大魏家地下水中氯离子天然背景为 $80\sim 130\text{ mg/L}$ ,枣园水源地为 $130\sim 170\text{ mg/L}$ ,而莱州湾一般为 $80\sim 100\text{ mg/L}$ ,因此选择背景值要因地制宜,尽量选择远离海岸线的补给区和污染少的区域。

地下水化学特征是判断海水入侵的直接依据,然而选用什么化学指标或特征值来判断、评价海水入侵及入侵程度至关重要。一般常用指标为 $\text{Cl}^-$ 和矿化度,但选用单一指标衡量和分级往往产生偏差,精度不够,采用多种指标综合进行判别是目前正在发展的方向。本次研究成果和已有研究成果均表明,氯离子浓度与 $\text{TDS}$ 、 $r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$ 、钠吸附比(SAR)、Br及Sr相关性强,可以联合建立海水入侵等级指标体系<sup>[29-31]</sup>。

$\text{Cl}^-$ 作为判定海水入侵指标,国内外大致将这一标准确定为 $200\sim 300\text{ mg/L}$ 。环渤海地区 $\text{Cl}^-$ 背景值普遍较低,通常小于 $200\text{ mg/L}$ ,而且地下水渗流途径短,溶滤作用弱, $\text{Cl}^-$ 浓度低且稳定,其浓度的剧烈增加,主要是由于海水入侵造成的。可见,如果采用 $\text{Cl}^-$ 含量 $200\sim 300\text{ mg/L}$ 作为工作区海水入侵判定标准,将不能准确判定海水是否入侵。因此, $\text{Cl}^-$ 含量等级的划分应结合该地区的地下水背景值的含量来划分等级,其他的划分标准既要考虑与氯离子的对应关系,也要考虑地下水的背景值。

### 2.2.2 水文地球化学分析

海水不同于地下淡水,有其自身的水化学特点,正是这种特殊性使得当海水入侵地下淡水后,入侵区的地下水表现出不同的水化学特征,这为从水文地球化学角度研究海水入侵成为可能。开展海水入侵区水文地球化学调查,研究地下水的水化学特征,是判断海水入侵与否、入侵范围和入侵严重程度的核心内容。海水入侵区水化学调查研究通常分析水体中分布最广、含量最多的7种离子,阴离子: $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ;阳离子: $\text{Ca}^+$ 、 $\text{Mg}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ ,同时配合分析反映海水入侵的一些较敏感指标,如Br、B、Li、Sr等元素。通过水化学成分的分析,绘制区域上的水化学场,讨论其在面上的分布特征,可以识别咸淡水过渡带,掌握海水入侵变化规律;通过水化学特征和特殊离子比的分析,可以判定海水和地下淡水混合后产生的系列水文地球化学作用,有利于提升对海水入侵的认识,同时,也可以为土壤盐渍化状况评价提供依据。

### 2.2.3 环境同位素示踪

随着同位素地球化学的迅速发展,特别是同位

素技术在地下水中的广泛应用,为研究海水入侵提供了新的手段<sup>[5,14,31,32-34]</sup>。稳定同位素主要包括<sup>2</sup>H、<sup>18</sup>O、<sup>11</sup>B、<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr、<sup>34</sup>S和<sup>13</sup>C。这些同位素运用的原理大多是基于各种同位素的特性以及不同水体往往具有显著不同的同位素特征值,如陆地淡水中的<sup>2</sup>H含量总是会超出几十个‰单位,而海咸水中几乎为零,从而可以利用这种同位素特征值上的差别来指示水体的混合作用以及水岩相互作用。目前运用较多的放射性同位素包括<sup>3</sup>H和<sup>14</sup>C,主要用于地下水测年与示踪的研究,以此来强化地下水径流系统,提高海水入侵过程中溶质运移路径和过程<sup>[35]</sup>。

#### 2.2.4 数值模拟

为了实现海水入侵超前的预测预报,对区域海水入侵进行概化模拟是必要手段。海水入侵模型研究经历了从理想假定到合理概化、室内实验模型、理想模型到数值模型这一发展过程<sup>[36]</sup>。数值方法已经成为模拟和求解海水入侵问题的最有力的工具。概括起来,研究海水入侵的模型按研究对象可分为突变界面模型与基于海水-淡水以弥散带接触的过渡带模型,过渡带模型也成为海水入侵研究的主要方向。

通过上海海水入侵等级的划分、水文地球化学分析和同位素示踪,可以揭示海水入侵的空间分布特征、盐分来源和溶质运移路径和过程等,结合基础调查所取得成果,能够阐明海水入侵机理和过渡带溶质运移规律,同时识别海水入侵与人为活动、自然因素的时空关联,准确刻画海水入侵概念模型。同时利用地下水动态监测结果、地质背景调查和综合分析的成果,建立海水入侵数值模型,为海水入侵预测预报提供实用基础。

#### 2.3 成果应用

在查清楚海水入侵区地质背景、地下水动态变化趋势和海水入侵机理的基础上,形成对应的海水入侵概念模型和数值模型,同时结合水质、水位的监测结果进行实时动态模拟,从而实现海水入侵发展方向的预测预报,提高对海水入侵的防范意识。此外要根据监测结果进行海水入侵的危害性、脆弱性、损失评估以及对城市功能的影响评价,提出防治有效的防治措施,进行防治工程的建设。

### 3 下一步研究方向建议

由于环渤海地区部分地段基础地质、水文地质资料精度不够,地下水位和水质动态监测数据不系

统,对海水入侵的研究不够透彻,仍存在较多的不确定性问题,较难评价人类活动对海水入侵影响的变化趋势,较难对海水入侵做出定量化预测。建议加强以下几个方面的深入研究。

(1)环渤海地区长期以来的地质工作积累了大量的地质资料,而这些资料缺乏专业、系统的整理和综合分析,可以在整合这些资料的基础上,适当补充新的地质调查工作来提高对区域水文地质条件的认识,为海水入侵及其他环境地质问题研究奠定基础。

(2)目前,环渤海地区的海水入侵监测在时间和空间上均不很系统,时间上存在不连续性和不对称性问题,空间上存在水平方向和垂向监测精度不高等问题。应构建系统的海水入侵监测网,加强海水入侵动态监测,为海水入侵危害性评价,数值模拟提供科学依据。

(3)通过这些年的调查发现,海水入侵已经形成的大规模咸水体,既使在大面积停止开采地下水,海水入侵趋势减缓的情况下,其影响范围还在扩大,对这一问题的研究仍不很清楚,有必要开展进一步工作。

(4)莱州湾南岸同时存在现代海水和古卤水,并已对多个第四系含水层形成入侵。该区是古卤水体入侵还是现代海水入侵,多年来亦存争议,应对此类问题的解决加强研究。

(5)目前海水入侵的研究主要集中在机理研究和模拟预测方面,较少考虑对生态环境的影响,因此需要对有关生态环境问题进行追踪监测。

### 4 结语

环渤海沿海地区是一个人口密度大、水资源短缺、地质环境脆弱的区域,由于在滨海部分地段长期超量开采地下淡水资源,导致了规模较大的海水入侵。多年来对海水入侵的调查研究工作,基本查清了不同地段不同类型海水入侵的机理和动态变化趋势,并提出了较为可靠的海水入侵防治建议,为区域海水入侵治理提供了科学依据。但随着海水入侵问题研究的深入,仍然存在水文地质条件调查精度不够、地下水动态监测不系统、海水入侵后期效应研究不透彻等问题,应持续加强海水入侵监测和研究。海水入侵研究是一个涉及多学科、且综合性很强的课题,首先要开展基础调查,对自然背景、人类活动背景和海水入侵现状及危害性进行调查研究和评估;其次要开展海水入侵综合研究,综合运用水化学

分析、同位素示踪、室内模拟试验等技术方法,在充分揭示海水入侵机理和过渡带溶质运移规律的基础上,建立海水入侵概念模型和数值模型;最后实现对海水入侵的动态模拟,预测预报其变化趋势,提高对海水入侵的防范意识。

#### 参考文献:

- [1] UN Atlas. UN Atlas: 44 Percent of us Live in Coastal Areas [EB/OL].<http://coastalchallenges.com/2010/01/31/un-atlas-60-of-us-live-in-the-coastal-areas.html>, 2010.
- [2] 赵玉灵.近30年来我国海岸线遥感调查与演变分析[J].国土资源遥感,2010,86(增刊):174-177.
- [3] Shi M Q. Spatial distribution of population in the low elevation coastal zone and assessment on vulnerability of natural disaster in the coastal area of China[D].Master thesis of Shanghai Normal University, 2012,24-32.
- [4] Grassi S, Cortecci G, Squarci P. Groundwater resource degradation in coastal plains: the example of the Cecina area (Tuscany-Central Italy)[J]. *Appl. Geochem*, 2007, 22: 2273-2289.
- [5] Dongmei Han, Claus Kohfahl, Xianfang Song. Geochemical and isotopic evidence for palaeo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou Bay, China [J], *Applied Geochemistry*, 2011, 26: 863-883.
- [6] 黄磊, 郭占荣. 中国沿海地区海水入侵机理及防治措施研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(2): 118-123.
- [7] Sherif M M, Hamza K I. Mitigation of seawater intrusion by pumping brackish water[J]. *Transport Porous Media*, 2001, 43: 29-44.
- [8] 尹怀宁, 张德君. 大连市地下水海水污染对土壤生态影响研究初报[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 5-6.
- [9] 孙晓明, 吴登定, 肖国强, 等. 环渤海地区地下水资源与环境地质若干问题探讨[J]. *地质调查与研究*, 2006, 29(1): 47-55.
- [10] 赵天石. 滨海岩溶地下水开发中的问题及根本治理途径[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1991, 2(4): 73-78.
- [11] 武强, 金玉洁, 李德安, 等. 大连大魏家岩溶地下水系统海水入侵机理与对策[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, 5(1): 64-68.
- [12] 盛学斌, 戴昭华, 杨明华. 大渤海区海水入侵态势与防治构[J]. *生态学报*, 1996, 16(4): 418-426.
- [13] 邹胜章, 朱远峰, 陈鸿汉, 等. 大连大魏家滨海岩溶区海水入侵化学过程[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(1): 61-68.
- [14] 杨吉龙, 韩冬梅, 苏小四, 等. 环境同位素特征对滨海岩溶地区海水入侵过程的指示意义[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(12): 1344-1352.
- [15] 韩再生, 高恩厚. 洋河、戴河冲洪积平原水文地球化学作用特征及其成因分析[J]. *勘察科学技术*, 1988, 4: 16-20.
- [16] 韩再生. 秦皇岛洋河、戴河滨海平原海水入侵的控制与治理[J]. *现代地质*, 1990, 4(2): 105-115.
- [17] 杨燕雄, 高树勇, 谢亚琼. 秦皇岛市海水入侵灾害评价及防治对策[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(3): 139-143.
- [18] 左文喆, 杨燕雄, 董军义, 等. 秦皇岛洋河-戴河沿海平原海水入侵数值模拟分析[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(12): 2087-2095.
- [19] 藏文学, 刘文军, 郭巨, 等. 河北省秦皇岛市海水入侵地质灾害及其防治措施[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(4): 120-125.
- [20] 肖国强, 杨吉龙, 胡云壮, 等. 秦皇岛洋-戴河滨海平原海水入侵过程水文化学识别[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21(2): 32-39.
- [21] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. *水文*, 2003, 23(3): 11-15.
- [22] 韩有松, 吴洪发. 莱州湾滨海平原地下卤水成因初探[J]. *地质论评*, 1982, 28(2): 126-131.
- [23] 韩有松, 孟广兰, 王少青, 等. 中国北方沿海第四纪地下水[M]. 科学出版社, 1996, 1-193.
- [24] 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.
- [25] 陈鸿汉, 张永祥, 王新民, 等. 潍河下游地区海水入侵动态系统分析[J]. *地理科学*, 1996, 16(3): 224-231.
- [26] 刘桂仪. 莱州湾南岸海咸水入侵的原因分析及防治对策[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(2): 1-4.
- [27] 吴吉春, 薛禹群, 谢春红, 等. 海水入侵过程中水-岩间的阳离子交换[J]. *水文地质工程地质*, 1996, (3): 18-19.
- [28] 毕延凤, 于洪军, 徐兴永, 等. 莱州湾南岸平原地下水化学特征研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(3): 241-247.
- [29] 赵建. 海水入侵水化学指标及侵染程度评价研究[J]. *地理科学*, 1998, 18(1): 16-24.
- [30] 樊丽芳, 陈植华. 深圳滨海地带海水入侵判定界限值的确定[J]. *勘察科学技术*, 2004, (3): 16-20.
- [31] 蒋方媛, 韩绘芳, 陈加红, 等. 地下水微量元素与同位素特征对海水入侵和地下水起源的指示意义 - 以深圳市宝安区为例[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 32(3): 253-260.
- [32] 潘曙兰, 马凤山. 海水入侵的同位素研究[J]. *地球学报*, 1977, 18(增刊): 310-312.
- [33] 张崇耿, 肖应凯. 硼同位素分馏及其在环境研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 2002(6): 54-60.
- [34] 卢继强, 陈刚, 胡成. 滨海地区海水入侵的水化学和同位素证据 - 以沿海某市典型地段为例[J]. *勘察科学技术*, 2004, (3): 22-26.
- [35] 尚海敏, 李国敏, 于进庆. 环境同位素技术在地下水研究中的应用[J]. *地下水*, 2008, 30(2): 18-22.
- [36] 李国敏, 陈崇希. 海水入侵研究现状及展望[J]. *地学前缘*, 1996, 3(1-2): 161-168.