

滨海含水层海水入侵影响因素研究综述

熊贵耀^{1,2,3}, 付腾飞^{2,3}, 徐兴永^{2,3}, 徐秀丽¹, 陈广泉^{2,3}, 刘文全^{2,3}, 苏 乔^{2,3}

(1. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 滨海含水层海水入侵的研究对于海水入侵的灾害防治及地下水资源的可持续管理具有重要的意义。基于国内外海水入侵影响因素研究现状, 归纳了地质条件(包括海岸边界坡度、含水层介质分层、水力传导系数和弥散度)和水动力条件(包括海平面和地下水位的变化)这两类基础的影响因素, 分析、总结了滨海含水层海水入侵机理, 同时指出将相互作用、互有联系的影响因素作为一个系统开展研究, 会更有利于理解海水入侵整个过程。

关键词: 海水入侵; 影响因素; 地质条件; 水动力条件

中图分类号: P641.69

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2019)06-0102-11

DOI: 10.11759/hyxx20181105001

世界上大约有 50% 的人口生活在滨海地区, 特别是在海岸线 60 km 以内的低洼三角洲地区。滨海含水层是滨海地区淡水的主要来源, 常用于饮用和灌溉^[1], 因此了解滨海含水层的水文过程(地下水位、地下水质量和潮位变化)对地下水资源的可持续利用具有重要意义^[2]。海水入侵是指在自然因素或者人为因素影响下, 滨海含水层中海水与淡水之间的动态平衡被破坏, 导致咸淡水界面向陆地方向移动的现象。Ghijben 和 Drabbe^[3] 于 1887 年在阿姆斯特丹附近的地下水资源勘探中首次发现这种现象。海水入侵不仅会使可用淡水储存减少, 更会引起土壤盐渍化等一系列生态退化问题^[4]。目前海水入侵影响着全球超过 50 个国家和地区, 特别是北非、中东、地中海、中国、墨西哥以及美国的大西洋和海湾地区^[5]。因此滨海含水层海水入侵的研究对于海水入侵的灾害防治及地下水资源的可持续管理具有重要的意义^[6]。

影响海水入侵的因素很多, 主要包括环境因素、气候因素和人为因素。自然条件下, 海水入侵是由海水和地下淡水之间的密度差异驱动水流和盐的迁移造成的, 海水入侵的发生必须具备一定的地质条件和水动力条件, 地质条件是海水入侵发生的基础条件, 控制着海水入侵的分布、发生路径及发生方式; 而水动力条件是海水入侵发生的诱因, 通过减少向海洋排泄地下水的水力梯度, 打破原有的海水与淡水之间的动态平衡, 引发海水入侵或者加剧海水入

侵的程度^[7-8]。本文在综合国内外相关文献的基础上将分别从地质条件和水动力条件两个影响因素展开探讨。

1 地质条件对滨海含水层海水入侵的影响

地质条件是影响海水入侵的基础条件, 决定着海水入侵的分布、途径和方式。自然界地质条件的复杂性与难以复制性, 导致关于地质条件影响海水入侵的机理的系统性研究很少。大部分研究都是通过设定单一的地质条件, 研究其他非地质条件对海

收稿日期: 2018-11-05; 修回日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41706068); 国家自然科学基金委员会—山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目(U1606401); 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室 2016 年度开放基金项目(201609)

[Foundation: National Natural Science Foundation Project, No.41706068; Project Jointly Funded by the National Natural Science Foundation of China-Marine Science Research Center of Shandong Province People's Government, No. U1606401; Shandong Provincial key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, 2016 Annual Open Fund Project, No. 201609]

作者简介: 熊贵耀(1994-), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事海水入侵方面研究, 电话: 18810613135, E-mail: xiongguiyao@sina.com; 徐兴永(1975-), 通信作者, 男, 山东郓城人, 研究员, 博士, 主要从事海岸带地质与第四纪环境、地质灾害等方面研究, 电话: 18669789811, E-mail: xuxingyong@fio.org.cn; 徐秀丽(1976-), 通信作者, 女, 河北卢龙人, 副教授, 博士, 主要从事海洋化学方面研究, 电话: 13522943401, E-mail: xuxl@cugb.edu.cn

水入侵的影响。通过分析总结前人的研究^[9-10],影响海水入侵的地质因素主要为海岸边界坡度、含水层介质分层状况、水力传导系数和弥散度等。

1.1 海岸边界坡度

海岸边界坡度是指近岸海水与海底接触面的角度。海岸边界的研究一般分为垂直和倾斜海岸边界研究。在现实条件中,海底通常会呈现一定的坡度,但是在大多数的研究中,由于缺少参数化的数据,导致倾斜海岸边界的研究难度提升,也增加了有限差分模型模拟的难度,因此研究者更倾向于简化成垂直的海岸边界。

在许多经典问题的理论研究中,都将海岸边界条件简化为垂直海岸边界^[11-14]。在一些实际应用中,研究者也会直接将海岸边界简化为垂直海岸边界,如 Gopinath 等^[15]通过区域调查结合模型研究海水入侵对印度 Tamilnadu 的 Nagapattinam 沿海含水层的影响。在一些有关海水入侵具体过程的研究中,研究者在实验室尺度的数值模拟中也忽略海岸边界的实际情况,使用垂直海岸边界,如 Morgan 等^[16]对海水入侵中的“overshoot 现象”的研究。Jakovic 等人^[17]对海水上溢影响区的特征的研究。

随着垂直海岸边界研究的进行,倾斜海岸边界也逐渐进入了研究的范围。有些研究者在研究区域真实的倾斜海岸边界的基础上对海水入侵的相关方面进行了研究,如 Gingerich 和 Voss^[18]通过三维变密度流动模型研究美国夏威夷 Oahu 岛南部海岸含水层,研究包括地下水流动、咸淡水接触面的变化及盐分分布。Yang 等^[19]建立二维模型研究德国北部地区海平面上升和风暴对滨海非均质含水层的影响。研究显示,海平面上升会迫使咸淡水接触面向内陆移动,含水层的盐化区域向内陆延伸更远,而风暴会导致被淹没的陆地表面盐碱化。Morgan 等人^[20]研究了倾斜海岸边界上的“overshoot 现象”。

目前,在众多涉及海岸边界条件的海水入侵问题的研究中,只有小部分直接研究了海岸边界坡度与海水入侵之间的关系,如 Kacimov 和 Obnosov^[21]通过对海水侵入海岸含水层中突变界面问题的研究,得出了海岸边界坡度与海水入侵程度之间的解析解,研究表明,海岸边界从垂直到平缓,海水入侵程度逐渐减小。Qu 等^[22]在前人研究基础上,通过数值模拟的方法研究了水力传导系数、各向异性、纵向/横向分散度比和海床坡度对地下水排泄(SGD)和盐度

分布的影响。Walther 等人^[23]利用一系列的坡度变化,通过改变附加敏感参数(淡水流入、纵向和横向弥散度),评价了海岸边界坡度对淡水含水层海水入侵模拟结果的影响。这些研究的结果都一致表明,海岸边界坡度变缓会使得含水层中的咸淡水接触带向海水方向运移,降低海水入侵的程度。而 Koussis 等人^[24]通过研究证实,除海岸边界的坡度对含水层海水入侵有影响外,含水层底部坡度的增加会导致海水入侵的程度减弱。

1.2 含水层介质分层

含水层介质分层是将地质体简化为若干水平层状结构,各层介质内均为各向同性。除了近乎均质和随机非均质介质外,层状地质结构在自然界中普遍存在^[15-29]。在海水入侵问题的研究中,大部分都是将地下含水层介质简化为均质^[30]。这样做的原因,一方面是因为现有的研究水平还不足以将自然界中的含水层结构复原出来,并定量地研究其影响;另一方面,简化含水层的地质结构,可以更有效地研究海水入侵的其他问题。在这种情况下,研究层状非均质含水层中海水入侵的相关问题则是一个进步。之前的研究集中在不考虑弥散的情况下,确定层状非均质含水层中咸淡水接触界面位置^[31-34]。有些学者则更详细地刻画了不同层状非均质含水层中海水入侵时盐分分布及水流路径,如 Frind^[35]用数值模拟方法研究了滨海承压含水层的海水入侵问题。作者发现,当 300 m 厚的含水层被 100 m 厚的含水层覆盖时,含水层对盐分的分布有控制作用,混合区域会向海洋和陆地两个方向延伸数公里。Lu 等^[36]则系统性地研究了含水层层状结构对咸淡水混合区的影响。研究结果显示,当水力传导系数较低的介质覆盖在一个水力传导系数相对较高的介质层时,由于淡水-盐水混合物的流线经介质层面分离,水力传导系数低的介质层中的混合区被加宽;相反,当一个水力传导系数高的介质层覆盖一个水力传导系数相对较低的介质层时,水力传导系数较高的介质层中的混合区略有缩小,因为流动折射挤压了下层的流线。同时,含水层层状结构显著地改变了海岸边界附近的流动路径和速率。在控制水头的海岸系统中,层状非均质含水层的淡水流入、海水流入和总流出分别由具有最大和最小水力传导系数的两个均质的情况所限定。经历过系统性的研究之后,在层状非均质含水层海水入侵的问题上结合物理屏障防治措施进行了更

加广泛的研究,如 Abdoulhalik 和 Ahmed^[37-38]则通过均质含水层对比,研究了层状非均质含水层对地下水坝和防渗墙效果的影响。研究表明,在层状非均质含水层中,水流会在层间发生折射,使得地下水坝及防渗墙等物理屏障在防治海水入侵时情况更加复杂多变。

1.3 水力传导系数

水力传导系数又称为渗透系数。在各向同性介质中,它被定义为单位水力梯度下的单位流量。以往的研究及经验都表明,含水层水力传导系数的增加会导致海水进一步向陆地方向入侵。但 Werner 和 Simmons^[7]的研究表明,含水层水力传导系数只有在一定范围内变化才能影响海水入侵的程度。在此范围之外,水力传导系数的影响微乎其微。在众多有关含水层导水率对海水入侵影响的研究中,大部分仅仅定性地评价了含水层水力传导系数与海水入侵之间的关系^[39]。而 GALDIT 评价方法的创建则将含水层水力传导系数对海水入侵的影响定量化,水力传导系数作为其中一个指标来评价滨海含水层中海水入侵的脆弱性及地下水质量。通过不断地研究含水层水力传导系数与海水入侵之间的关系,调整水力传导系数在该评价体系中的比重,使得 GALDIT 评价方法更精确^[40-42]。在一系列定性和定量研究的基础上,部分学者对水力传导系数与海水入侵之间的关系展开了更进一步的研究。Lecca 和 Cau^[43], Kerrou 等^[44]使用 Monte Carlo 模拟试验研究了滨海含水层水力传导系数非均匀性对咸淡水混合区的影响。Herckenrath 等^[45]建立了一种基于 Henry 问题的盐水入侵模型,研究了含水层水力传导系数以不同的形式分布时,由于地下淡水排泄量减少而引发的海水入侵过程。Zhao 等^[46]在稳态滨海含水层模拟咸淡水混合区的不确定性与敏感性分析中,对水力传导系数与含水层中咸淡水混合区的位置及厚度进行了系统性的研究。研究表明,相比于控制水头的含水层系统,在控制流量的滨海含水层系统中,水力传导系数对咸淡水混合区的位置及厚度影响更大。水力传导系数增大,咸淡水混合区的位置会向着陆地方向运移,咸淡水混合区的厚度则减小。而 Strack 等^[47]研究发现,降低靠近海岸的含水层上部的水力传导系数可以减弱海水入侵的程度。总体而言,水力传导系数与海水入侵之间关系的系统研究仍然不足。

1.4 弥散度

弥散度是表征可溶性物质通过渗透介质时弥散现象强弱的指标。弥散是影响含水层中溶质运移的一个重要因素。而弥散又分为横向弥散与纵向弥散,两者对咸淡水混合区有着不同的影响。其中,含水层弥散度的几何平均值与水平渗透率决定着盐水楔的水平渗透,而横向弥散度与导水率的几何平均值是控制进入含水层中盐水量的主要因素^[48]。总体而言,在海水入侵过程中,弥散度主要影响着含水层中咸淡水混合区的厚度及位置,研究证明,当弥散度增大时,含水层中咸淡水混合的厚度变大,同时,高浓度盐水楔趾(saltwater toe)向海水收缩,低浓度盐水楔趾向陆地方向延伸^[49-50]。而纵向弥散度与横向弥散度的比值,又决定了混合带等浓度线的斜率及海水循环速率。一般情况下,随着纵向弥散与横向弥散比值的增加,咸淡水混合带等浓度线的斜率及海水循环速率随之减小^[22]。稳定状态下,混合区的厚度主要由局部横向弥散所控制,这也解释了室内试验中观察到的狭窄混合区现象^[51]。一些研究表明,含水层的释水系数在弥散度对咸淡水混合区的影响中也发挥着重大作用。在释水系数较大的含水层中,横向和纵向弥散对咸淡水混合区的影响最大^[52]。

2 水动力条件对滨海含水层海水入侵的影响

水动力条件作为海水入侵的必要条件之一,为海水入侵提供驱动力,决定着海水入侵的速度和程度。相比于地质条件,水动力条件可在短时间内受到人为或者某些自然因素的影响而改变,总体而言,水动力条件改变的直接原因包括海平面变化和地下水位变化两个方面。通过分析总结前人的研究^[53-57],将海平面上升、潮汐和波浪等归为海平面的变化;地下水补给和人为开采地下水等归为地下水位的变化。

2.1 海平面的变化

目前,有关海平面变化对海水入侵影响的研究主要涉及海平面上升和海平面周期性波动两个方面。研究内容包括海平面变化对海水入侵的单一影响以及海平面变化与其他影响因素共同作用下对海水入侵产生的综合影响。

2.1.1 海平面上升

海平面自上个冰河时代结束以来一直在上升,但近来人为温室气体排放到大气层而引起热膨胀

和冰川融化可能加剧了上升速度^[58]。全球平均海平面在 20 世纪以 1.8 mm/a 的平均速度上升^[58-60]。Nicholls 和 Cazenave^[61]估计, 在 1992 年至 2010 年, 全球平均海平面每年上升约 3.3 mm, 在世界范围内海平面的变化在空间上略有差别。IPCC^[62]第五次评估报告指出, 1901 年至 2010 年, 全球平均海平面上升了 0.19 m, 海平面平均上升速率为 1.7 mm/a; 而海平面上升速率并非稳定不变, 在 1993 年至 2010 年和 1930 年至 1950 年两个期间, 全球平均海平面上升速率接近 3.2 mm/a, 远高于 20 世纪全球平均海平面上升速率。IPCC^[63]报告指出, 到 2100 年底, 全球海平面将上升 0.09 至 0.88 m。

自海水入侵现象第一次被发现至今, 有关海平面上升对海水入侵影响的研究很多, 其中大部分是在各研究区的实际地质、水文、气候等环境背景的基础上, 采用数值模型等手段研究海平面上升对该研究区含水层盐分分布及迁移的影响, 如 Leatherman^[64]使用 Bruun 规则和经验模型两种不同的方法研究了海平面上升对德克萨斯州加尔维斯顿湾含水层盐渍化的影响。Essink^[65]使用三维瞬态密度驱动地下水流动模型来模拟荷兰沿海含水层中的盐水入侵。研究中模拟了 3 种海平面上升情景: 没有上升, 海平面每世纪上升 50 cm, 海平面每世纪下降 50 cm。得到的结论是, 在海平面保持不变的情景中, 海水入侵将会以极缓慢的速度进行, 最后达到稳定; 在每世纪海平面上升 50 cm 情景下, 所有低洼地区的地下水盐度更接近海水的盐度; 在每世纪海平面下降 50 cm 情景下, 初期海水向内陆运移, 之后缓慢的退离陆地。Dausman 和 Langevin^[66]对佛罗里达州布罗德县的滨海含水层进行了 SEAWAT 模拟, 并证明如果在未来 100 年海平面上升大于 48 cm, 那么当地许多井田将容易受到氯化物污染。Giambastiani 等^[67]对意大利 Ravenna 滨海潜水含水层中的海水入侵进行了数值模拟研究。结果表明, 在海平面每世纪上升 0.475 m 的条件下, 淡水和咸水之间的混合区将向内陆迁移约 800 m。Mehdizadeh 等^[68]则通过砂箱实验和数值模拟研究猝发式海平面上升(Instantaneous SLR) 和逐步上升(Gradual SLR)两种情况对滨海层状含水层海水入侵的影响, 研究结果显示, 猝发式海平面上升会在拥有隔水层的含水层底部形成“overshoot”现象, 其他形式的海平面上升与含水层结构则不会形成此类现象。或者将海平面上升与土地利用方式、地下水开采等因素结合起来研究对海

水入侵的影响, 如 Lambrakis 和 Kallergis^[69]建立自然补给条件下地下水净化模型, 研究了气候和土地利用对 Greece 地区滨海含水层地下水质量的影响。研究表明, 在气候和人类活动的共同作用下, 研究区地下水经过阳离子交换、钙离子溶解及海水入侵等过程, 水质逐渐恶化。Ranjan 等^[70]利用突变界面假设, 分析了气候变化和土地利用对斯里兰卡滨海地下水资源的影响。研究表明, 降水和温度的变化与研究区地下水资源的损失没有必然关系, 而干旱指数与地下淡水资源的损失呈极强的负相关关系, 由气候变化或人类活动引发的盐水入侵会严重影响地下淡水资源量。Loáiciga 等^[71]采用水文地质资料和有限元数值模型 FEFLOW, 模拟不同情形下海平面上升和地下水开采对 California 的 Monterey 城滨海区含水层海水入侵的可能影响。模拟结果显示, 地下水开采对于该区域含水层海水入侵的影响程度要大于海平面变化。Feseker^[72]应用数值模型评估气候变化和土地利用方式的改变对滨海含水层盐分分布的影响。该数值模型是在位于德国北部海岸的 CAT-field 相关参数的基础上建立起来的。研究表明, 海平面上升可能导致海水入侵的快速发展。此外, 改变边界条件引起的变化的时间尺度约为几十年甚至几个世纪, 因此目前的盐分分布并不能代表长期平衡状态。

2.1.2 海平面周期性变化

近几年, 部分学者研究了潮汐及波浪等周期性的海平面变化对海水入侵的驱动及对咸淡水界面之间海水与地下水循环模式的影响。如 Robinson 等^[73]通过现场监测和数值模拟等手段, 研究了砂质海滩中潮间带区域的地下水动态, 其中重点研究了垂直水力梯度和孔隙水盐度。研究表明, 潮汐和波浪为近岸含水层的地下水流动和盐分运移提供了水动力条件。同时, 潮汐通过上高盐水楔(the upper saline plume)会引起相对快速的海水循环。Xin 等^[74]建立水动力模型模拟潮汐和波浪分别驱动及共同作用下的海平面动态变化。研究结果显示, 波浪在近岸含水层中产生水力梯度驱动了孔隙水循环, 形成类似于潮汐形成的上高盐水楔。同时, 潮汐和波浪的共同效果相比于单一驱动的影响, 两者的共同效果在近岸潮间带引起了更加快速的海水循环, 加快了海底河口与海洋之间的交换。Robinson 等^[75], Maji 和 Smith^[76], Li 等^[77]通过数值模拟, 而 Vandenbohede 和 Lebbe^[78]与 Colbert 等^[79]; Anschutz 等^[80]分别通过区域监测和室内试验研究了潮汐对地下河口处海水与地下水交换、海水

再循环的影响。研究结果显示,潮位振荡引起了大量海水通过地下河口的快速再循环,这对海底地下水排泄的形成有很大的贡献。与海水再循环有关的盐分迁移导致潮间带形成上层盐水楔。与较低的盐水楔形物相比,上层盐水楔作为潜在的重要混合和反应区,可能会对地下河口污染物的去向产生重大影响。Boufadel^[81]通过室内试验和数值模拟相结合的方式,研究了基于地下水排泄到海洋中的条件下,潮汐对滩涂地下含水层水力状况的影响。研究结果显示,在潮汐的作用下,会在潮间带形成一个盐水楔,盐水楔的最大深度可达潮间带的中间部分。同时,盐水楔的存在,减少了地下淡水向海水排泄的面积,水力梯度增加,对防治海水入侵起到一定作用。

潮汐等周期性的海平面变化也促使滨海地下含水层中盐分的再分布,如 Vandenbohede 和 Lebbe^[82]采用现场观测和地下水流模拟的方法,研究了潮汐对比比利时西部沿海平原环境的影响。研究表明,潮汐与海岸地形的相互作用会影响地下含水层盐度分布。Robinson 等^[83]通过建立区域监测系统,收集哥伦比亚地区含水层地下淡水排泄速率、潮汐波动和咸淡水过渡区等相关信息,建立起潮汐波动、地下淡水排泄速率和含水层盐分分布之间的关系。研究表明,潮汐或波浪会导致咸淡水混合区域盐度稳态被打破,使得盐分重新分布以达到一个平衡状态。Robinson 等^[84]通过区域监测和数值模拟,研究非承压含水层潮间带在大小潮周期中,孔隙水盐度分布与地下水流动的动态变化。经研究,在大小潮周期中,位于潮间带中的上高盐水楔会随着潮汐的波动而膨胀和收缩。这表明,潮汐对该地区含水层中的淡水与海水之间的循环有着明显的控制作用。以上研究分别表明,在真实的滨海环境中,潮汐及波浪都会在潮间带引起相对快速的海水循环,加快滨海地下含水层与海洋之间的物质交换。同时,潮汐会在潮间带形成一个“上高盐水区”,上高盐盐区的存在改变了近岸含水层的盐分分布。并使含水层的地下水与海水进行交换的面积变小,地下水向海水排泄的水力梯度增大,在一定程度上减缓了海水入侵的进程。

另外,潮汐对咸淡水接触面的位置和形状都有一定的影响。如 Ataie-Ashtiani 等^[85]建立变密度地下水模型分析潮汐波动对非承压含水层海水入侵的影响。研究结果显示,潮汐运动会加剧海水向内陆入侵且咸淡水接触面的厚度会加大。同时,潮汐运动对倾斜海滩的影响比垂直海岸的影响更大。Werner 和

Lockington^[86], Mao 等^[87]使用数值模型,在基于陆地边界为定水头的条件下,研究了潮汐波动对近岸地下水流动和盐分运移的影响。Werner 和 Lockington^[86]研究结果表明,潮汐作用在垂直的海洋边界会形成一个更加分散的咸淡水接触带,但对于海水侵入地下淡水含水层的距离则没有明显的影响。另一方面, Mao 等^[87]则指出,相比于垂直的海洋边界,潮汐作用于轻度倾斜的海洋边界,海水侵入含水层的总距离会增加。Vallejos 等^[88]通过区域监测,研究在潮汐和大气压力的条件下,地下水位对地下咸淡水接触带的影响。结果表明,海平面在高潮位时,压力水平增加,盐水楔朝陆地方向移动。在低潮位时,咸淡水接触带后退,观测井的盐度下降。在大气压力高的情况下,地下水平面下降,盐水楔后退;反之,地下水平面上升,盐水楔前进。

不同周期的海平面波动对海水入侵的影响是不同的,除了潮汐、波浪和季节波动等常见短周期海平面波动对海水入侵影响的研究外,部分学者还进行了其他周期的研究,如 Lee^[89]研究了除潮汐和季节波动尺度外,不同周期和振幅的海平面变化对海底地下水排泄(submarine groundwater discharge)、循环海底地下水排泄(recirculated submarine groundwater discharge)不同程度的影响。研究显示,海底地下水排泄量和循环地下水排泄量越大,对阻止海水入侵的效果越好,所以不同周期和振幅对阻止滨海含水层海水入侵具有不同程度的效果。另外发现,例如全球气候变化这类长周期的海平面变化,会导致循环海底地下水排泄量增加,当含水层的水力传导系数较小的时候,这种现象更加显著。而时间尺度超过千年的海平面周期性波动对含水层中咸淡水的分布具有更强的控制作用,Meisler 等^[90]利用有限差分计算机模型,分析了长周期海平面波动对北大西洋海岸平原(新泽西至北卡罗莱纳)淡水和咸水之间过渡带发展的影响。研究表明,由于最近海平面处于周期性波动的上升期,咸淡水过渡带目前正缓慢地向陆地方向移动,通过横向水粒速度的估计,近海界面正以大约每 10 000 年 0.2 mile(即约 3.218 7 mm/a)的速度向陆地移动;而在第四纪、上新世和可能的中新世期间,由于海平面的大规模海平面升降,盐水的循环运动导致了盐水和淡水的混合,并产生了明显的较为宽广的过渡带。

2.2 地下水位的变化

地下水位的变化会引起地下含水层中地下水与

海水之间水力梯度发生改变。一般情况下,当地下水位的降低导致地下水与海水之间的动态平衡被打破,海淡水之间的水力梯度发生逆转时,地下含水层就具备了海水入侵发生的水动力条件。

地下水位的变化通常都是由外部因素引起的,由于影响因素多样,且每种因素的影响范围和周期不同,导致地下水位与滨海含水层海水入侵之间的关系很复杂,有关地下水位对海水入侵直接影响的研究很少。在大多数涉及地下水位与海水入侵的研究中,都是探究地下水位变化的影响因素对海水入侵的影响,如地下水补给、潮汐及波浪等。

对于地下水位与海水入侵之间关系的研究,一般是通过建立监测体系对已经发生海水入侵现象或者有相关趋势的地区进行长期监测以确定该区域的海水入侵演化趋势及相关影响因素,如 Lee 和 Song^[91]通过在朝鲜半岛的西部和南部建立地下水位与电导率的自动监测系统,研究由于农业灌溉引起的地下水位变化与海水入侵之间的关系。或者进行区域地质及水化学调查建立该区域地下水位与海水入侵之间的联系,如 Arslan 等^[92]在土耳其 Bafra 平原通过水化学和同位素方法研究海水入侵的速率与地下水位之间的关系。Sivasankar 等^[93]在印度南部 Rameswaram 岛利用 87 份地下水样的多项理化性质指标的检测数据并结合地理信息系统,证实了由于地下水位的下降,该地区地下水收到了海水入侵的影响。还有一部分研究则是通过建立数值模型或者新方法将地下水位变化与滨海含水层海水入侵联系起来。如 Cartwright 等人^[94]通过现场观测和建立滨海含水层动态突变界面模型,研究由波浪引起的地下水咸水侧水位变化对咸淡水接触面的影响。Kumar^[95]围绕着滨海含水层研究引起含水层地下水水质变化的各项影响因素。研究表明海水入侵含水层的程度取决于地下水的数量、地下水位、含水层与咸水源距离排水渠道的远近、含水层的水力特性及其地质结构。Arslan^[96]使用九种不同的方法相互比较、补充,研究土耳其 Çarşamba 平原地下水位的变化对含水层发生海水入侵风险的影响。Kazakis 等^[97]基于地下水位、地下水分布等 6 个参数修改了 GALDIT 方法,建立了滨海地下含水层中海水入侵的脆弱性系统评估方法。

其中,过度开采地下水是海水入侵最普遍的诱因。薛禹群等^[98]和黄磊等^[99]在综合有关资料的基础上指出,过量开采地下水是造成中国沿海地区海水

入侵的主要原因。薛禹群等^[100]在莱州湾海水入侵研究的基础上解释了过量开采地下水引起大规模海水入侵的动力学机理。同时指出,开采地下水、潜水面波动和降水补给的变化等外部因素都会影响咸淡水过渡带的宽度。姚菁等^[101]对莱州湾海水入侵区地下水水化学特征进行分析,结果表明,研究区海水入侵的程度与地下水的开采程度有直接联系。每年的 2 月份至 6 月份地下淡水遭过量开采,导致咸淡水界面向内陆方向推进,入侵区面积不断扩大。

3 结论与展望

了解滨海含水层海水入侵的影响因素对于自然灾害的防治具有重要意义。在滨海含水层海水入侵的过程中,需要综合考虑影响因素之间的关系,从整体上研究该因素对海水入侵的影响。但是目前仍有许多影响因素未开展系统性的研究。本文将研究程度较高的自然条件下的影响因素进行梳理,划分为地质条件和水动力条件两类。

影响海水入侵的地质因素有很多,主要为海岸边界坡度、含水层介质分层、水力传导系数和弥散度 4 类,海岸边界主要为垂直海岸边界和倾斜海岸边界,边界条件直接影响了海水在边界区的循环模式;含水层可分为均质含水层和层状非均质含水层,含水层的结构则控制了咸淡水过渡带中水盐的运移路径;同时,水力传导系数和弥散度的不同直接影响海水入侵过程中咸淡水接触带的运移和分布。同时将水动力条件归为海平面变化和地下水位变化两类,两者均是直接改变咸淡水之间的水力梯度,打破原有的动态平衡,驱动海水入侵的发展。海平面变化可分为海平面上升和海平面周期性波动两类,两者在不同的时间尺度上构建咸淡水之间新的水力梯度平衡,控制着海水入侵现象的发生。

由于不同影响因素研究的复杂性,有些方面的研究还很薄弱,需要投入更多的研究。比如: (1) 目前,在海水入侵的相关研究中,计算机模拟技术只是作为一种辅助验证手段。随着计算机技术的成熟与发展,可将其作为一种主要研究方法,研究复杂条件下的海水入侵过程。(2) 海水入侵的影响因素庞大而复杂,多数影响因素之间是相互联系、相互作用的。目前,大多数的研究只考虑了其中一个或者两个参数对海水入侵过程的影响。未来,将多类或多个影响因素作为一个系统研究其共同作用对海水入侵过程的影响会成为一个趋势。(3) 海水入侵作为一种生

态灾害,与土壤盐渍化、生态退化等灾害有着密切的联系。这些灾害在成因上相互关联、互为因果,在时间上有先后顺序,在空间上彼此相依,构成地质灾害链。未来,从灾害链的角度研究相关灾害对海水入侵的影响会成为一个新的研究点。

参考文献:

- [1] Rahman M A T M T, Majumder R K, Rahman S H, et al. Sources of deep groundwater salinity in the southwestern zone of Bangladesh[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(2): 363-373.
- [2] Kumar P, Tsujimura M, Nakano T, et al. Time series analysis for the estimation of tidal fluctuation effect on different aquifers in a small coastal area of Saijo plain, Ehime prefecture, Japan[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, 35(2): 239-250.
- [3] Ghijben B W, Drabbe J. Nota in Verband met de Voorgenomen Putboring Nabij Amsterdam[R]. Hague: Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1889, 8-22.
- [4] Li Zhenhan, Zhang Chunrong. The present and analysis of the sea water intrusion in coastland of Rizhao[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009, 36(5): 129-132.
- [5] Werner A D, Bakker M, Post V E A, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51(1): 3-26.
- [6] Pérez-martín M A, Estrela T, Andreu J, et al. Modeling water resources and river-aquifer interaction in the Júcar River Basin, Spain[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(12): 4337-4358.
- [7] Werner A D, Simmons C T. Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers[J]. *Ground Water*, 2009, 47(2): 197-204.
- [8] Sun W C, 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.
- [9] Held R, Attinger S, Kinzelbach W. Homogenization and effective parameters for the Henry problem in heterogeneous formations[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(11): W11420.
- [10] 寇英杰, 王颖. 辽宁省海水入侵成因及防治措施[J]. *辽宁地质*, 2000, 17(1): 67-71.
Kou Yingjie, Wang Ying. Genesis and controlling measures of marine invasion in Liaoning Province[J]. *Liaoning Geology*, 2000, 17(1): 67-71.
- [11] Henry H R. Salt intrusion into coastal aquifers[R]. Washington: U.S. Geological Survey, 1960.
- [12] Cooper H H. A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer[C]//Cooper H H, Kohout F A, Henry H R, et al. *Sea Water in Coastal Aquifers*. Washington: US Geological Survey Water Supply Paper 1613-C. 1964: 1-11.
- [13] 吴吉春, 薛禹群, 谢春红, 等. 改进特征有限元法求解高度非线性的海水入侵问题[J]. *计算物理*, 1996, 13(2): 201-206.
Wu Jichun, Xue Yuqun, Xie Chunhong, et al. Improved characteristic finite element method in solving highly nonlinear sea water intrusion problem[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1996, 13(2): 201-206.
- [14] 周训. 海岸带咸淡水界面位置确定方法的介绍[J]. *现代地质*, 2008, 22(1): 123-128.
Zhou Xun. An introduction to determination of the location of fresh water-salt water interface in coastal zones[J]. *Geoscience*, 2008, 22(1): 123-128.
- [15] Gopinath S, Srinivasamoorthy K, Saravanan K, et al. Modeling saline water intrusion in Nagapattinam coastal aquifers, Tamilnadu, India[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2016, 2(1): 2.
- [16] Morgan L K, Bakker M, Werner A D. Occurrence of seawater intrusion overshoot[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 1989-1999.
- [17] Jakovovic D, Werner A D, De Louw P G B, et al. Salt-water upconing zone of influence[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 94: 75-86.
- [18] Gingerich S B, Voss C I. Three-dimensional variable-density flow simulation of a coastal aquifer in southern Oahu, Hawaii, USA[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(2): 436-450.
- [19] Yang Jie, Graf T, Ptak T. Sea level rise and storm surge effects in a coastal heterogeneous aquifer: A 2D modelling study in northern Germany[J]. *Grundwasser*, 2015, 20(1): 1-13.
- [20] Morgan L K, Stoeckl L, Werner A D, et al. An assessment of seawater intrusion overshoot using physical and numerical modeling[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(10): 6522-6526.
- [21] Kacimov A R, Obnosov Y V. Analytical solution for a sharp interface problem in sea water intrusion into a coastal aquifer[J]. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2001, 457(2016): 3023-3038.
- [22] Qu Wenjing, Li Hailong, Wan Li, et al. Numerical simulations of steady-state salinity distribution and submarine groundwater discharges in homogeneous anisotropic coastal aquifers[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 74: 318-328.
- [23] Walther M, Graf T, Kolditz O, et al. How significant is the slope of the sea-side boundary for modelling sea-water intrusion in coastal aquifers? [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 648-659.

- [24] Koussis A D, Mazi K, Riou F, et al. A correction for Dupuit–Forchheimer interface flow models of seawater intrusion in unconfined coastal aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 277-285.
- [25] 成建梅, 陈崇希, 吉孟瑞, 等. 山东烟台夹河中、下游地区海水入侵三维水质数值模拟研究[J]. *地学前缘*, 2001, 8(1): 179-184.
Cheng Jianmei, Chen Chongxi, Ji Mengrui, et al. Three-dimensional numerical study for salt water intrusion in multi-layered coastal aquifers in the Jiahe River Basin, Shandong Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(1): 179-184.
- [26] 苗青, 陈广泉, 刘文全, 等. 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, et al. Disaster evolution and genesis of seawater intrusion in the Laizhou Bay[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 32(2): 69-78.
- [27] Guo Qiaoguo, Li Hailong, Boufadel M C, et al. Hydrodynamics in a gravel beach and its impact on the Exxon Valdez oil[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2010, 115(C12): 21.
- [28] Li Hailong, Boufadel M C. Long-term persistence of oil from the Exxon Valdez spill in two-layer beaches[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 96-99.
- [29] Xia Yuqiang, Li Hailong, Boufadel M C, et al. Hydrodynamic factors affecting the persistence of the Exxon Valdez oil in a shallow bedrock beach[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(10): 79-93.
- [30] 马凤山, 蔡祖煌, 宋维华. 海水入侵机理及其防治措施[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1997, 8(4): 16-22.
Ma Fengshan, Cai Zuhuang, Song Weihua. Saline intrusion mechanism and its control measures[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1997, 8(4): 16-22.
- [31] Essaid H I. A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: Model development and application[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1431-1454.
- [32] Dagan G, Zeitoun D G. Seawater-freshwater interface in a stratified aquifer of random permeability distribution[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 29(3): 185-203.
- [33] Kerrou J, Renard P. A numerical analysis of dimensionality and heterogeneity effects on advective dispersive seawater intrusion processes[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(1): 55-72.
- [34] Liu Yi, Mao Xiaomin, Chen Jian, et al. Influence of a coarse interlayer on seawater intrusion and contaminant migration in coastal aquifers[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 28(20): 5162-5175.
- [35] Frind E O. Seawater intrusion in continuous coastal aquifer-aquitard systems ☆[J]. *Advances in Water Resources*, 1982, 5(2): 89-97.
- [36] Lu Chunhui, Chen Yiming, Zhang Chang, et al. Steady-state freshwater–seawater mixing zone in stratified coastal aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 505(21): 24-34.
- [37] Abdoulhalik A, Ahmed A A. How does layered heterogeneity affect the ability of subsurface dams to clean up coastal aquifers contaminated with seawater intrusion? [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 708-721.
- [38] Abdoulhalik A, Ahmed A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: Experimental and numerical study[J]. *Journal of environmental management*, 2017, 199: 62-73.
- [39] Zeng Xiankui, Dong Jian, Wang Dong, et al. Identifying key factors of the seawater intrusion model of Dagou River Basin, Jiaozhou Bay[J]. *Environmental Research*, 2018, 165: 425-430.
- [40] Ferreira L, Joao P, Chachadi A G, et al. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 application to the portuguese aquifer of monte gordo[J]. *IAHS-AISH*, 2007, 310: 161-172.
- [41] Recinos N, Kallioras A, Pliakas F, et al. Application of GALDIT index to assess the intrinsic vulnerability to seawater intrusion of coastal granular aquifers[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1017-1032.
- [42] Bouderbala A, Remini B, Saaed hamoudi A, et al. Assessment of groundwater vulnerability and quality in coastal aquifers: A case study (Tipaza, North Algeria)[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(3): 1-12.
- [43] Lecca G, Cau P. Using a Monte Carlo approach to evaluate seawater intrusion in the Oristano coastal aquifer: A case study from the AQUAGRID collaborative computing platform[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2009, 34(10-12): 654-661.
- [44] Kerrou J, Renard P, Lecca G, et al. Grid-enabled Monte Carlo analysis of the impacts of uncertain discharge rates on seawater intrusion in the Korba aquifer (Tunisia)[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55(8): 1325-1336.
- [45] Herckenrath D, Langevin C D, Doherty J. Predictive uncertainty analysis of a saltwater intrusion model using null-space Monte Carlo[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(5): 143-158.
- [46] Zhao Zhongwei, Zhao Jian, Xin Pei, et al. Uncertainty and sensitivity analyses of the simulated seawater-freshwater mixing zones in steady-state coastal aquifers[J]. *China Ocean Engineering*, 2015, 29(4): 489-502.
- [47] Strack O D L, Stoeckl L, Damm K, et al. Reduction of saltwater intrusion by modifying hydraulic conductivi-

- ty[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 6978-6988.
- [48] Abarca E, Carrera J, Sánchez-vila X, et al. Anisotropic dispersive Henry problem[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 913-926.
- [49] Sanz E, Voss C I. Inverse modeling for seawater intrusion in coastal aquifers: Insights about parameter sensitivities, variances, correlations and estimation procedures derived from the Henry problem[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(3): 439-457.
- [50] Lu Chunhui, Luo Jian. Dynamics of freshwater-seawater mixing zone development in dual-domain formations[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(11): 208-217.
- [51] Paster A, Dagan G. Mixing at the interface between two fluids in porous media: A boundary-layer solution[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 584(10): 455-472.
- [52] Pool M, Post V E A, Simmons C T. Effects of tidal fluctuations on mixing and spreading in coastal aquifers: Homogeneous case[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(8): 6910-6926.
- [53] Prieto C, Destouni G. Quantifying hydrological and tidal influences on groundwater discharges into coastal waters[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(12): 2179-2187.
- [54] Robinson C, Li L, Prommer H. Tide-induced recirculation across the aquifer-ocean interface[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(7): W07428.
- [55] Li H, Boufadel M C, Weaver J W. Tide-induced seawater-groundwater circulation in shallow beach aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1): 211-224.
- [56] 蔡祖煌, 马凤山. 海水入侵的基本理论及其在入侵发展预测中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1996, 7(3): 1-9.
- Cai Zuhuang, Ma Fengshan. Basic theory of saline intrusion and its application to prediction of saline intrusion development[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1996, 7(3): 1-9.
- [57] 张奇. 海水入侵的实验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(4): 43-47.
- Zhang Qi. An experimental study of sea water intrusion[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2005, 32(4): 43-47.
- [58] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [59] Douglas B C. Global sea level rise: A redetermination[J]. *Surveys in Geophysics*, 1997, 18(2-3): 279-292.
- [60] Bates B, Kundzewicz Z W, Wu S, et al. *Climate Change and Water*[M]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2008, 6: 1-210.
- [61] Nicholls R J, Cazenave A. Sea-level rise and its impacts on coastal zones[J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1517-1520.
- [62] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2013: the Scientific Basis*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [63] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2001: the Scientific Basis*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [64] Leatherman S P. Coastal geomorphic response to sea level rise: Galveston Bay, Texas[C]// Barth M C, Titus J G(eds). *Greenhouse Effect and Sea Level Rise: A Challenge for this Generation*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984: 151-178.
- [65] Essink G H P O. Salt water intrusion in a three-dimensional groundwater system in the Netherlands: A numerical study[J]. *Transport in Porous Media*, 2001, 43(1): 137-158.
- [66] Dausman A, Langevin C D. Movement of the saltwater interface in the surficial aquifer system in response to hydrologic stresses and water-management practices, Broward county, Florida[J]. *U.S. Geological Survey*, 2005: 1-73.
- [67] Giambastiani B M S, Antonellini M, Essink G H P O, et al. Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): A numerical model[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1-2): 91-104.
- [68] Mehdizadeh S S, Karamalipour S E, Asoodeh R. Sea level rise effect on seawater intrusion into layered coastal aquifers (simulation using dispersive and sharp-interface approaches)[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 138: 11-18.
- [69] Lambrakis N, Kallergis G. Reaction of subsurface coastal aquifers to climate and land use changes in Greece: Modelling of groundwater refreshing patterns under natural recharge conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 245(1-4): 19-31.
- [70] Ranjan P, Kazama S, Sawamoto M. Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(4): 388-399.
- [71] Loáiciga H A, Pingel T J, Garcia E S. Sea water intrusion by sea-level rise: Scenarios for the 21st Century[J]. *Ground Water*, 2011, 50(1): 37-47.
- [72] Feseker T. Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(2): 267-279.
- [73] Robinson C, Gibbes B, Li L. Driving mechanisms for groundwater flow and salt transport in a subterranean estuary[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(3): 155-170.
- [74] Xin Pei, Robinson C, LI Ling, et al. Effects of wave

- forcing on a subterranean estuary[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): 439-445.
- [75] Robinson C, Li L, Barry D A. Effect of tidal forcing on a subterranean estuary[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 851-865.
- [76] Maji R, Smith L. Quantitative analysis of seabed mixing and intertidal zone discharge in coastal aquifers[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(11): 60-71.
- [77] Li Xinya, Hu B X, Burnett W C, et al. Submarine ground water discharge driven by tidal pumping in a heterogeneous aquifer[J]. *Ground Water*, 2009, 47(4): 558-568.
- [78] Vandenbohede A, Lebbe L. Occurrence of salt water above fresh water in dynamic equilibrium in a coastal groundwater flow system near De Panne, Belgium[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(4): 462-472.
- [79] Colbert S L, Berelson W M, Hammond D E. Radon-222 budget in Catalina Harbor, California: 2. Flow dynamics and residence time in a tidal beach[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(2): 659-665.
- [80] Anschutz P, Smith T, Mouret A, et al. Tidal sands as biogeochemical reactors[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2009, 84(1): 84-90.
- [81] Boufadel M C. A mechanistic study of nonlinear solute transport in a groundwater-surface water system under steady state and transient hydraulic conditions[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(9): 2549-2565.
- [82] Vandenbohede A, Lebbe L. Effects of tides on a sloping shore: Groundwater dynamics and propagation of the tidal wave[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(4): 645-658.
- [83] Robinson M, Dan G, Reay W. Field observations of tidal and seasonal variations in ground water discharge to tidal estuarine surface water[J]. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 1998, 18(1): 83-92.
- [84] Robinson C, Gibbes B, Carey H, et al. Salt-freshwater dynamics in a subterranean estuary over a spring-neap tidal cycle[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2007, 112(C9): 14.
- [85] Ataie-Ashtiani B, Volker R E, Lockington D A. Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1-2): 17-31.
- [86] Werner A D, Lockington D A. Tidal impacts on riparian salinities near estuaries[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3-4): 511-522.
- [87] Mao X, Enot P, Barry D A, et al. Tidal influence on behaviour of a coastal aquifer adjacent to a low-relief estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1): 110-127.
- [88] Vallejos A, Sola F, Pulido-bosch A. Processes influencing groundwater level and the freshwater-saltwater interface in a coastal aquifer[J]. *Water Resources Management*, 2014, 29(3): 679-697.
- [89] Lee E, Hyun Y, Lee K K. Sea level periodic change and its impact on submarine groundwater discharge rate in coastal aquifer[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2013, 121-122(3): 51-60.
- [90] Meisler H, Leahy P P, Knobel L L. Effect of eustatic sea-level changes on saltwater-freshwater in the northern atlantic coastal plain[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 1984, 23(6): 1071-1076.
- [91] Lee J Y, Song S H. Evaluation of groundwater quality in coastal areas: implications for sustainable agriculture[J]. *Environmental Geology*, 2007, 52(7): 1231-1242.
- [92] Arslan H, Cemek B, Demir Y. Determination of seawater intrusion via hydrochemicals and isotopes in Bafra Plain, Turkey[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(13): 3907-3922.
- [93] Sivsankar V, Ramachandramoorthy T, Kumar M S. Deterioration of coastal groundwater quality in Rameswaram Island of Ramanathapuram District, Southern India[J]. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2013, 35(2): 91-98.
- [94] Cartwright N, Li L, Nielsen P. Response of the salt-freshwater interface in a coastal aquifer to a wave-induced groundwater pulse: Field observations and modelling[J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(3): 297-303.
- [95] Kumar C P. Management of groundwater in salt water ingress coastal aquifers[C]// Ghosh N C, Sharma K D. *Groundwater Modelling and Management*. New Delhi: Capital Publishing Company, 2006: 540-560.
- [96] Arslan H. Estimation of spatial distribution of groundwater level and risky areas of seawater intrusion on the coastal region in Carsamba Plain, Turkey, using different interpolation methods[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(8): 5123-5134.
- [97] Kazakis N, Spiliotis M, Voudouris K, et al. A fuzzy multicriteria categorization of the GALDIT method to assess seawater intrusion vulnerability of coastal aquifers[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 524-534.
- [98] 薛禹群, 谢春红, 吴吉春, 等. 海水入侵研究[J]. *水文地质工程地质*, 1992, 13(6): 29-33.
Xue Yuqun, Xie Chunhong, Wu Jichun, et al. Seawater intrusion[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1992, 13(6): 29-33.
- [99] 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.
Huang Lei, Guo Zhanrong. Mechanism of sea water in-

- trusion in China's coastal areas and its prevention countermeasures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 118-123.
- [100] 薛禹群, 吴吉春, 谢春红, 等. 莱州湾沿岸海水入侵与咸水入侵研究[J]. 科学通报, 1997, 42(22): 2360-2368.
- Xue Yuqun, Wu Jichun, Xie Chunhong, et al. Study on seawater invasion and salt water invasion in the Laizhou Bay[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(22): 2360-2368.
- [101] 姚菁, 于洪军, 王树昆, 等. 莱州湾海水入侵区地下水水化学特征[J]. 海洋科学, 2007, 31(4): 32-36.
- Yao Jing, Yu Hongjun, Wang Shukun, et al. The underground water hydrochemical characteristics of seawater invasion area around Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2007, 31(4): 32-36.

Review of factors affecting seawater intrusion in coastal aquifers

XIONG Gui-yao^{1, 2, 3}, FU Teng-fei^{2, 3}, XU Xing-yong^{2, 3}, XU Xiu-li¹,
CHEN Guang-quan^{2, 3}, LIU Wen-quan^{2, 3}, SU Qiao^{2, 3}

(1. School of Ocean Sciences, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China)

Received: Nov. 5, 2018

Key words: seawater intrusion; influencing factor; geological conditions; hydrodynamic conditions

Abstract: The study of seawater intrusion in coastal aquifers is of great significance for the prevention and control of seawater intrusion and the sustainable management of groundwater resources. Based on the research status of the influencing factors of seawater intrusion at home and abroad, this paper summarizes the geological conditions (including coastal boundary slope, aquifer media stratification, hydraulic conductivity, and dispersion) and hydrodynamic conditions (including changes in sea level and groundwater level). Based on the dominant influencing factors of seawater intrusion, the mechanism of seawater intrusion in the coastal aquifer is analyzed and summarized. Moreover, it is pointed out that it will be more conducive to understand the whole process of seawater intrusion by studying the influencing factors of interaction and interrelation as a system.

(本文编辑: 刘珊珊)