

# 莱州湾南岸潍坊北部平原区 咸水入侵动态变化分析

管清花<sup>1,2</sup>, 陈学群<sup>1,2</sup>, 张婧<sup>3</sup>

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250013; 3. 山东省科学院, 山东 济南 250014)

**摘要:**以莱州湾南岸潍坊北部平原地区为典型研究区,阐述了咸水体形成的成因背景与分布特征。通过水化学分析的方法,分析了潍北平原地下水水化学变化特征,及人工开采导致咸水入侵的变化,并分析了咸水入侵的主要成因。

**关键词:**咸水入侵;水化学;超采地下水;莱州湾南岸

中图分类号:X523

文献标识码:B

莱州湾南岸的潍坊北部平原地区,包括寿光、寒亭和昌邑3个市,海岸线全长113 km,为河流冲洪积与海水作用形成的平原区,该区赋存高浓度的地下卤水,随着南部地下淡水资源的过度开采,淡水水头不断降低,导致北部咸水不断向南入侵,引发了地下水水质恶化,淡水资源匮乏加剧,农业生态环境遭到破坏,海咸水区耕地资源退化,给当地造成巨大的经济损失。

## 1 咸水入侵的历年变化

由于咸水的不同来源,一般在不清楚入侵源的情况下,国际上把“海水入侵”、“咸水入侵”、“盐水入侵”、“卤水入侵”等统称为“咸水入侵”(saltwater intrusion),根据我国的实际情况,把现代海水引起的入侵称为海水入侵,而把由其他方面原因引起的入侵称为咸水入侵<sup>[1]</sup>。

20世纪80年代以来由于南部地下水淡水的过量开采,潍北平原海咸水入侵呈加重趋势,据调查1990年咸水入侵面积为276.1 km<sup>2</sup>,2002年潍北平原海咸水入侵面积达到413 km<sup>2</sup>,到2011年海咸水入侵面积达到762.8 km<sup>2</sup>(图1),其中寿光市入侵面积327.8 km<sup>2</sup>,寒亭130 km<sup>2</sup>,昌邑入侵面积305 km<sup>2</sup>

(表1)。2002—2011年间增长了349.8 km<sup>2</sup>,年入侵速率为34.98 km<sup>2</sup>。咸淡水界面变化带的分布自西向东经过寿光台头镇—王高镇—田柳镇—寒亭固堤镇—柳疃镇—昌邑夏店镇—卜庄。南北最大入侵距离为自北向南经过昌邑市龙池镇,入侵长度为35.5 km,东西最大入侵长度为88 km。

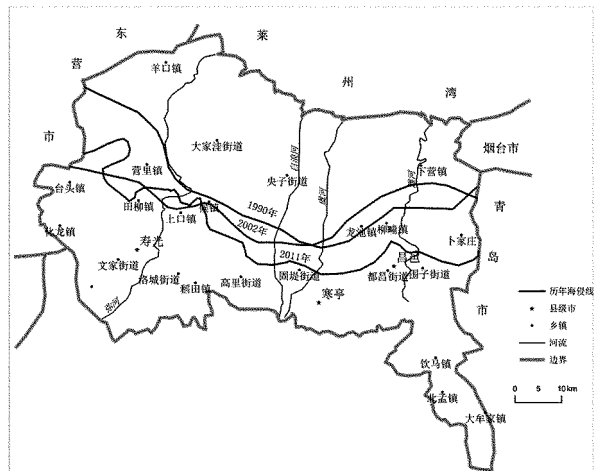


图1 咸水入侵动态变化线

## 2 咸水入侵的水化学变化

收稿日期:2014-04-04;修订日期:2014-06-30;编辑:曹丽丽

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费(200901076);国家海洋局公益项目(201105020);国家自然科学基金(40776050)

作者简介:管清花(1981—),女,山东潍坊人,工程师,主要从事水文地质、水资源与水环境工作;E-mail:qhguan0120@163.com。

表1 历年咸水入侵面积统计

时间	寿光	寒亭	昌邑	咸水入侵面积/km <sup>2</sup>
1990年	110.4	85.1	80.6	276.1
2002年	165	127	121	413
2011年	327.8	130	305	762.8

2.1 区域水化学变化分析

该次在潍北平原地区增设83个水文监测点,5条垂直咸淡水界面线的监测剖面,主要监测地下水水位和水质的变化(Cl<sup>-</sup>、矿化度、pH值)。其中在寒亭区陆地与海洋的垂直方向设1条多指标监测剖面,分别在淡水区-咸水入侵过渡区-微咸水区-咸水区-卤水区选取5个采样点,采集地下水水样进行多指标分析,分析指标为pH值,总硬度、Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>等14个指标,通过对地下水的水化学特点的分析,探讨海咸水入侵来源及变化规律。水质水位监测点及监测剖面位置见图2。

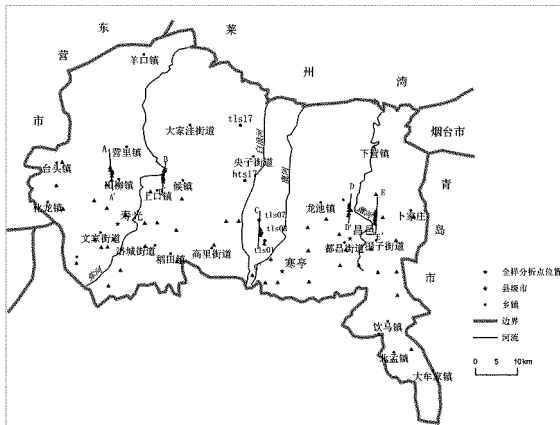


图2 监测点及监测剖面位置图

潍北平原寒亭区5个多指标地下水样编号分别为 hts01, hts03, hts07, hts17, tls17, 监测井深度为40~60 m, 为第四系孔隙水含水层组, 图3是根据检测结果选择典型检测指标 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup> 绘制了Piper 三线图。该剖面取样点位置自陆地向海洋方向编号为: hts01→hts03→hts07→hts17→tls17, 根据 piper 图可以看出, 随着地下水自内陆向海洋天然排泄的径流方向<sup>[2]</sup>, 地下水化学类型的变化趋势为: Ca - Mg - SO<sub>4</sub> - HCO<sub>3</sub> → Na - Ca - SO<sub>4</sub> - Cl → Na - Cl → Na - Mg - Cl, 即由重碳酸钙镁型向氯化钠、氯化镁型演变。从海洋到陆地 Cl<sup>-</sup> 的变化时从低到高又低的状态, 中部高值区达到 50 g/L。潍北平原陆地区地下水淡水以陆相溶滤水为主, 由陆向海过渡区是由不同地质时期形成的重

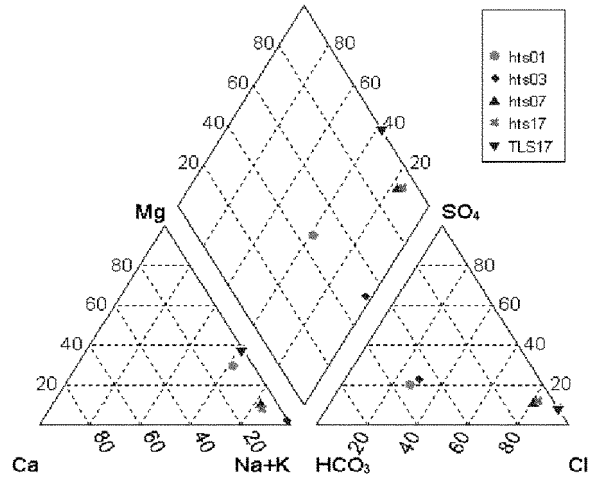


图3 典型剖面水样的Piper 三线图

卤水, 近海陆地及河口地带为陆相、海陆交互相、海相沉积水。自然状态下其水化学特征为: 降水、地表水、地下水、海水相互转化, 过渡区由于地质时期受海水蒸发影响使地下水中 Cl<sup>-</sup> 含量较高, 形成地下水卤水区; 潍北平原区地表水、地下水分布大体一致, 均从山丘经平原独流入海, 在径流过程中, 地层介质矿物成分比较稳定, 可溶性较差; 特定的环境使地下水化学特征具有山丘→平原→海岸洼地的明显分带性<sup>[3]</sup>。水化学类型由水质较优的 HCO<sub>3</sub> - Ca 型向 HCO<sub>3</sub> · Cl - Ca 型过渡到 Cl · HCO<sub>3</sub> - Na 或 NaCl 型水, 地下水矿化度由 <1.0 g/L 逐渐变为 1.0 ~ 2.0 g/L 过渡到 3 ~ 50 g/L 甚至达到 50 g/L。

2.2 单离子浓度梯度变化分析

对5个水样的单离子指标进行了分析, 图4的横坐标为距离海岸线的距离, 纵坐标为离子浓度。

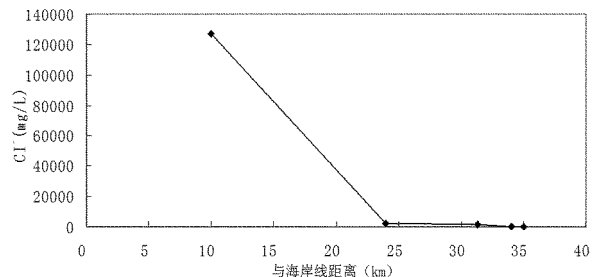


图4 地下水中的 Cl<sup>-</sup> 浓度变化曲线

由图4—图9可以看出, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 和矿化度等由陆地向海洋方向含量增大, 其中 Cl<sup>-</sup> 在 hts07 号井增大到 1 418.42 mg/L, 至 t17 已增大到 127 294 mg/L, Cl<sup>-</sup> 浓度大于海水, 该区距离海岸线 25 km 处为地下水古卤水富集区, 古卤水的埋藏深度一般在 60 m 以下; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度至距离海岸线最

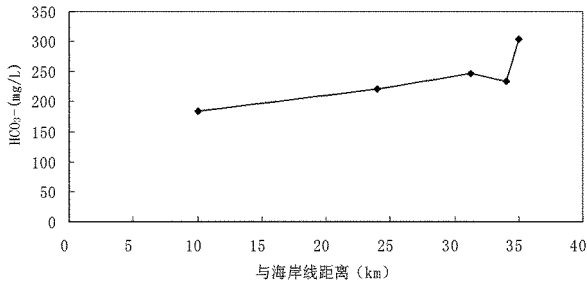
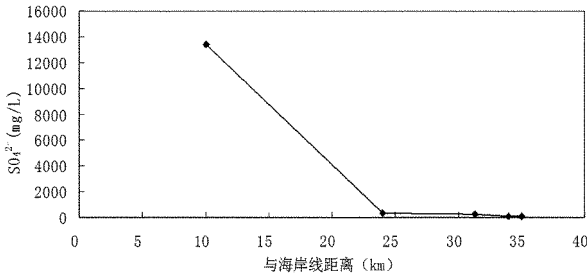
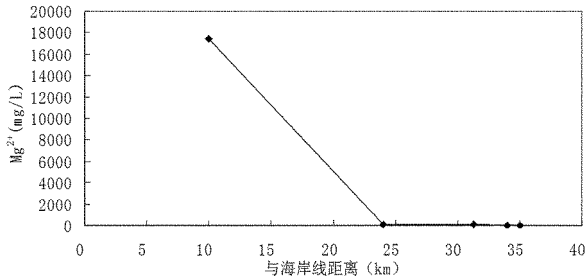
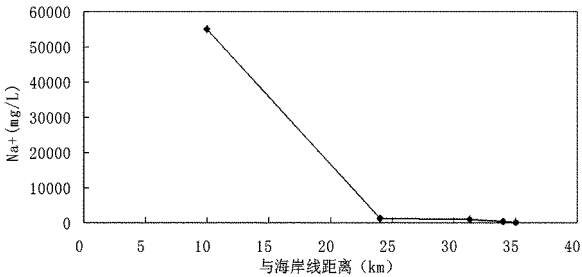
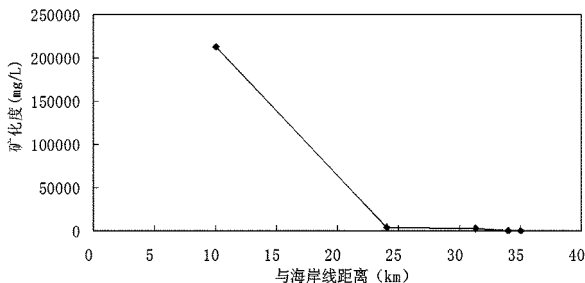
图5 地下水中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度变化曲线图6 地下水中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度变化曲线图7 地下水中的 Mg<sup>2+</sup> 浓度变化曲线图8 地下水中的 Na<sup>+</sup> 浓度变化曲线

图9 地下水中的矿化度浓度变化曲线

近的 t117 增大到 13 375 mg/L, 该剖面地下水水质最终由陆地的重碳酸钙型过渡到近海区的硫酸盐氯化

物型水, 水化学特点沿地下水由陆地向海洋径流方向成规律性变化, 且 t117 点附近氯化物、硫酸盐浓度高于海水, 这体现出潍北平原北部高浓度咸水体沿海岸线一定距离呈带状分布的特点。

根据研究, Cl<sup>-</sup> 在地下水流动过程中通常不发生离子交换、吸附等化学反应, 是进行地下水流程分析的较好的示踪离子。从图 4 至图 9 可以看出, 沿地下水水流方向, Cl<sup>-</sup> 浓度逐步增大, 局部地区高于海水浓度; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度不断减少, 主要是发生了脱碳酸作用; Ca<sup>2+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度不断增加, 一是石膏类矿物沿水流方向不断溶解, 二是海水中该成分的含量较高, 在此区富集。Na<sup>+</sup> 变化与 Cl<sup>-</sup> 基本一致。由于古卤水分布在海陆过渡带上, 因此当咸淡水附近的水平衡被破坏时, 会导致古卤水从承压含水层向淡水区域入侵。

由于海水入侵使矿化度和 Cl<sup>-</sup> 等主要化学成分增高, 同时其他水化学类型也趋于复杂, 根据区域水化学变化特点, 潍北平原区地下水的分布可分为 3 个带, 自内陆向海洋依次为: 第 I 带远海陆地区: 主要为 Ca·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub> 或 Ca·Mg-SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub> 型地下水, 分布于离海岸较远的南部平原地区, 主要为淡水区域。第 II 带卤水分布区: Na·Mg-Cl·SO<sub>4</sub> 或 Na·Mg-SO<sub>4</sub>·Cl 型地下水, 混合水水化学特征, 分布于卤水区, 该区氯离子能到高于海水区, 一般为 10~50 g/L。第 III 带近海区: 水化学类型复杂, 主要有 Na·Ca-SO<sub>4</sub>·Cl 和 Na·Mg-SO<sub>4</sub>·Cl 等, 近海区域, 该区受海水涨潮及地下水位变化的影响, 地下水中的 Cl<sup>-</sup> 浓度较高, 但是低于卤水分布区。

潍北平原地下水化学特征, 是地下水卤水形成与分布的反映, 该区地下水绝大部分属于陆相溶滤潜水<sup>[4]</sup>, 水化学成分的水平分带是不同溶滤阶段和途径的产物。靠近海边的河口和低洼地带的咸水是蒸发浓缩作用形成的卤水。在淡水和咸水之间, 普遍存在着混合作用及弥散作用, 形成宽度不等的过渡地带。

### 3 咸水入侵的成因分析

#### 3.1 地下水超采改变了地下水动力场

地下水超采, 导致地下水位持续下降, 进而诱发了海咸水入侵、地下水污染等水生态环境问题。据统计, 寒亭区东寺水源地年超采量 80 万 m<sup>3</sup>, 寿光市

自来水厂年超采量 79 万  $m^3$ , 昌邑市第一、第二自来水厂年超采量分别为 390 万  $m^3$  和 360 万  $m^3$ , 据资料分析 20 世纪 70 年代地下水由南部淡化区向北处于自然径流, 整个区域内无明显的降落漏斗。自 20 世纪 80 年代中期以来, 潍坊市连续十几年干旱少雨, 地表水资源紧缺, 地下水被大量开采, 到 1990 年寿光东南部、寒亭南部及昌邑城区附近出现地下水降落漏斗, 寿光的东南部地下水漏斗中心水位降至 -15.84 m, 昌邑城区形成了 -4m 的地下水降落漏斗中心; 到 1995 年寒亭区南部出现了中心最大降深为 -6m 的地下水漏斗; 到 2000 年地下水漏斗进一步扩大, 寿光漏斗区中心水位最大降深达到 -21.89 m, 寒亭和昌邑两个漏斗区中心水位降至 -8 m; 到 2008 年, 漏斗面积进一步扩大, 寿光漏斗中心地下水埋深 27.43 m, 形成了寿光-寒亭-昌邑的片状的“W”漏斗区, 漏斗区面积达到 747  $km^2$ 。由此看出淮北平原由于过度开采地下水, 导致地下水位持续下降, 地下水水动力条件发生改变, 破坏了海咸水和淡水的动态平衡, 使北部卤水区一侧静水压力增大, 从而导致咸水不断向南入侵, 造成淮北平原地区咸水区面积不断扩大, 水质进一步恶化<sup>[5]</sup>。

### 3.2 水文地质条件的影响

淮北平原地下卤水矿主要赋存于第四系海相地层的松散沉积物中, 主要以粉砂为主, 还包括细砂、淤泥质粉砂、粗砾砂、粉砂质粘土<sup>[6]</sup>。咸水体的矿化度在南北水平方向和垂直方向上都具有明显的分带、分层性特点。根据地质钻孔资料与地层剖面资料分析, 区域内第四系含水层主要有 4 个含水层组, 第一含水层为潜水, 埋深为 5 ~ 15 m, 近年来由于大量开采地下水, 第一含水层已经基本疏干; 第二含水层位微承压水, 顶板埋深一般在 10 ~ 15 m, 底板埋深为 20 ~ 30 m, 岩性以粉砂为主; 第三含水层组顶板埋深一般在 35 ~ 40 m, 底板埋深为 40 ~ 50 m, 含水层厚度 5 ~ 10 m, 岩性以粉砂、粉细砂和中砂为主, 该层顶部一般有 10 ~ 20 m 砂质粘土或者粘质砂土与第一含水层组相隔, 形成承压含水层; 第四承压含水层组, 埋深在 60 m 以上, 岩性以中砂为主。区域内含水层及其顶、底板弱透水层的发育是向南北方向延伸, 向北延伸至海底, 且在南北方向连续性较好, 地下水由南部淡水区向北排泄入海。

因此, 含水层的联系分布及透水性较好的砂层是导致咸水入侵的重要原因, 随着对承压含水层地

下水的开采, 由于水文地质条件和地下水超采的双重影响将导致咸水体侵染到其他的含水层位<sup>[7]</sup>。

### 3.3 降雨及地形地貌的影响

淮北平原 20 世纪 80 年代连续十几年的干旱也是造成咸水入侵的重要原因, 淮北平原地区多年平均降雨量为 586.8 mm, 1983—1989 年的年均降雨量为 492.3, 其中 1986 年仅为 388.5 mm, 导致地下水补给量减少, 但是为了满足工农业的要求, 地下水开采量持续增大, 结果加大了咸水入侵的速率, 1990 年以后, 虽然降雨量增加, 但是随着工业、生活对地下水的需求量增加, 地下漏斗区进一步扩大, 近年来咸水入侵区也在扩大。

淮北平原地处白浪河、弥河和虞河下游入海口附近, 海岸线较长, 地形平坦开阔, 河床比降小, 地层由第四系中、下更新统松散岩层组成的含水层系统, 其岩性为粘质砂土、砂质粘土组成海积平原, 该区是著名的卤水区, 该区盐田、虾池广布, 成为盐业、盐化工开发区及人工海产养殖区, 盐田、虾池的建设使大量海水人为进入内陆, 生产季节蓄水水位为地上水位, 明显高于地下水水位, 虽然有防渗层相隔, 但在水位差较大的长期作用下, 海、卤水仍有大量深入, 无疑对浅层淡水有咸化作用, 所以, 在该区域, 盐田、虾池两种人工地形是加剧海水入侵的主要原因<sup>[8]</sup>。另外, 弥河、白浪河、虞河、堤河、潍河、胶莱河的人海口在潮间带形成宽 10 ~ 200 m, 深 1.5 ~ 5 m 的若干条槽道, 在各河流潮间槽道的两侧, 潮水沟也比较发育, 但其延伸多不超出潮间带。槽道和潮水沟的发育为海水入侵内陆提供了通道。

## 4 结语

淮北平原咸水入侵是以  $Cl^-$  浓度 250 mg/L, 矿化度 1 g/L 作为咸淡水界面判别标准, 据统计, 淮北平原地区 1990 年咸水入侵面积为 276.1  $km^2$ , 2011 年到 2002 年 10 年间增长了 349.8  $km^2$ , 入侵速率为 34.98  $km^2/a$ , 其中寿光市入侵面积 327.8  $km^2$ , 寒亭入侵面积 130  $km^2$ , 昌邑入侵面积 305  $km^2$ 。通过调查, 淮北平原咸水入侵层位为第一潜水微承压含水层和第二、三承压含水层为主, 含水层埋深主要在 20 ~ 60 m 之间, 该海水层以粉砂和中砂为主, 含水层的透水性和联系性较好, 成为海水入侵的良好通道。

## 参考文献:

- [1] 李福林,赵德三.海水入侵防治研究与实践进展[A]//海岸带地质环境与城市发展研讨会论文集[C].天津,2004:50-56.
- [2] 薛禹群,吴吉春.莱州湾沿岸海水入侵与咸水入侵研究[J].科学通报,1997,(11):2365-2366.
- [3] 范维星,王兰中.潍坊市北部沿海地区海咸水入侵灾害及防治对策[J].山东地质,2001,16(1):46-47.
- [4] 李国敏,陈崇希.海水入侵研究现状与展望[J].地学前缘,1996,3(1,2):1-5.
- [5] 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,(3):68-71.
- [6] 尹泽生.莱州市滨海区域海水入侵研究[J].北京:海洋出版社,1992:137-142.
- [7] 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,(7):118-122.
- [8] 安永会,张福存.莱州湾滨海平原咸水入侵分析与趋势预测——以山东广饶县为例[J].环境科学与技术,2009,(5):81-84.

## Analysis on Dynamic Changes of Salt Water Intrusion in Northern Weibei Plain in South Laizhou Bay

GUAN Qinghua<sup>1,2</sup>, CHEN Xuequn<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>3</sup>

(1. Shandong Institute of Water Resources Research, Shandong Jinan 250013, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Shandong Jinan 250013, China; 3. Shandong Academy of Sciences, Shandong Jinan 250014, China)

**Abstract:** In this paper, setting northern Weifang plain in southern Laizhou Bay as the typical research area, geological background of salt water formation and distribution have been described. Through water chemistry method, characteristics of water chemistry change of underground brine and the change of saltwater intrusion caused by human activities in northern Weifang plain have been analyzed. Main causes of salt water intrusion has been analyzed as well.

**Key words:** Salt water intrusion; water chemistry; over-exploiting groundwater