

大连市海水入侵区地下水系统保护标准研究

荆艳东¹ 李忠国² 束龙仓¹ 李砚阁³

(1.河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 2.辽宁省水文水资源勘测局, 沈阳 110003

3.南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 海水入侵是沿海地区的环境问题之一, 我国自 1964 年在大连沿海首次发现海水入侵, 目前海水入侵已经严重制约了大连市经济的高速发展, 还影响了当地人们的正常生活, 为此提出大连市海水入侵区地下水系统保护的标准, 具有重要的现实意义和实用价值。本文主要从以下几方面进行了研究: ①对大连市海水入侵现状、入侵原因及其产生的危害进行了深入、系统的分析: 2002 年海水入侵总面积达 405.8 km², 垂直方向的特点是上淡下咸并具有成层性; 海水入侵必须具备两个条件, 一是水文地质条件, 二是水动力条件, 只有两者同时存在, 才会发生海水入侵; 海水入侵对工农业生产、生态环境及其人们身体健康均造成了不同程度的影响。②进一步丰富了海水入侵与地下水位及开采量的关系理论: 地下水位降低是导致海水入侵的内在原因, 并提出只有在充分考虑研究区地层岩性、地质构造、岩溶发育程度和开采性质及地下水开发利用程度的情况下, 再从具体的观测点入手研究海水入侵与地下水位之间的关系才更具有现实指导意义; 海水入侵与开采量之间存在正比关系, 增加地下水的开采就会加剧海水入侵。③提出海水入侵区地下水系统保护的标准, 即为: 在尽可能减轻海水入侵危害程度和满足经济社会发展对地下水资源需求的同时, 海水入侵区地下水系统的保护标准为: 地下水的开采量应低于开采量的阈值, 水位应高于地下水水位阈值。④根据现有的地下水动态监测资料, 结合大连市地质、水文地质条件, 提出人工神经网络方法和遗传算法为海水入侵区地下水系统保护标准的确定方法, 并分别采用此两种方法, 得到甘井子区地下水开采量阈值为 $3000 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$, 旅顺口区地下水开采量阈值为 $1264 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。⑤提出因地制宜的海水入侵防治措施。

关键词: 大连市 海水入侵 地下水系统 保护标准 人工神经网络 遗传算法 防治措施

1. 研究区概况

1.1 地理位置

大连市座落在辽东半岛的南端, 三面环海, 北依大陆。地处东经 120°58'~123°31', 北纬 38°43'~40°10'之间, 东临黄海, 西濒渤海, 南与山东半岛隔海相望, 北部及东北部与盖州市、岫岩县、东沟县接壤。这里冬无严寒, 夏无酷暑, 四季分明, 气候宜人, 是理想的旅游胜地和闻名遐迩的鱼果之乡。工业基础实力雄厚, 天然良港世界著名, 是东北的门户, 是重要的港口城市和工业基地, 也是一座风景优美的旅游城市, 大连市的地理位置见图 1。

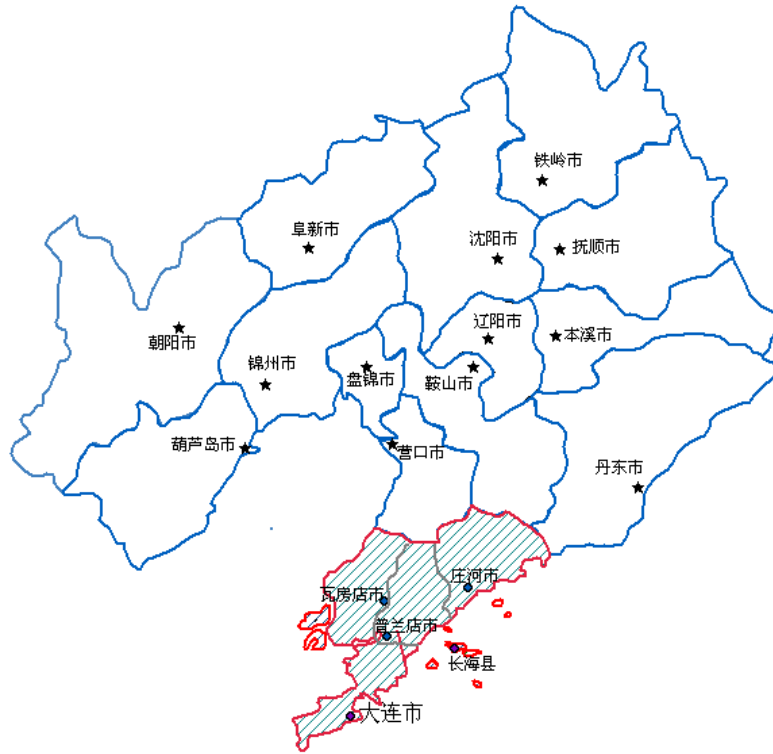


图 1 大连市位置图

1.2 地质构造及地质条件

本区在大地构造上属阴山纬向构造带与新华夏系第一个巨型隆起带的复合部位，构造复杂，存在着纬向构造体系、华夏系构造体系和新华夏系构造体系、北西向构造等。

前第四纪地层：区内出露地层有前震旦系、震旦系、寒武系、奥陶系、石炭系、侏罗系地层，其中以震旦系和前震旦系地层分布最为广泛。

第四纪：本区第四纪地层不发育，分布面积小、层薄而且变化大，成因类型复杂。

1.3 气象

大连地区地处北半球的暖温带，属暖温带半湿润大陆性季风气候，气候特点是：气候温和、四季分明、暖湿同季、雨量集中、日照丰富、季风盛行。最冷月（1月）平均气温在 $-4.5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 之间，是东北地区最暖和的区域，最热月（8月）平均气温在 24°C 上下，是同纬度地区中最凉爽的区域之一，年平均气温在 $8.8\sim 10.5^{\circ}\text{C}$ 之间。其中，南部地区（大连市区、旅顺、金州、长海，下同）在 10.5°C 左右；北部地区（普兰店市、瓦房店市、庄河市，下同）在 9.1°C 左右。全年 0°C 以上的持续日数，南部地区约 265 天，北部地区约 250 天。日最低气温小于等于 -10°C 的日数，北部地区为 49~54 天，南部地区为 18~25 天。无霜期北部地区为 168~190 天，南部地区为 196~220 天。

2. 研究区的地下水开采

2.1 地下水开发利用现状

大连市的地下水开发利用分成如下四个阶段：

第一阶段：少量开采阶段。全市仅有局部地区少量地开发利用浅层地下水，其补给、径流和排泄基本处于天然状态，时段大致为六十年代以前；

第二阶段：地下水开采量持续增长阶段。时段大致为六十年代至八十年代初期，地下水的开采逐步增加，开采深度也从浅层到深层，但是，这一阶段地下水开采还没有引发严重的环境地质问题，地下水流场变化不大，但是该阶段后期地下水开发利用加快，机井建设的峰期出现在 1978 年左右；

第三阶段：该阶段为地下水持续大规模开采阶段。大致时间为 1984 年~1990 年，这一时期正是我国摆脱束缚生产力发展的枷锁，经济发展全面起步，水资源管理没有跟上经济发展的步伐，造成取水量处于无序增长的阶段；

第四阶段：地下水开采量逐步调整阶段。特别是 1994 年以后，地下水开采量总体上呈现下降趋势，这是鉴于地下水开发利用过程中出现了一系列问题，水资源管理部门加强了管理力度，并先后出台了一些法律和法规，使地下水的开发利用从无序到有序，力求使其进入合理开发状态。但是，由于近些年来大连市经济的快速发展，耗水总量增加。遇到特殊年份，地表水供水不足时，地下水开采量仍然很大。例如，1994 年开采量达 34953 万 m^3 ，比 1993 年和 1995 年分别高出 5604 万 m^3 、6414 万 m^3 ，详见图 2。

2.2 海水入侵现状

根据地下水动态监测资料分析，大连市滨海岩溶地下水的海水入侵在时间上的变化趋势大致如下：

六十年代初期，地下水基本处于天然状态，近海地段仅受海潮影响，水质稍坏，自然入侵面积仅 4 Km^2 左右，主要分布在大连湾沿岸附近。

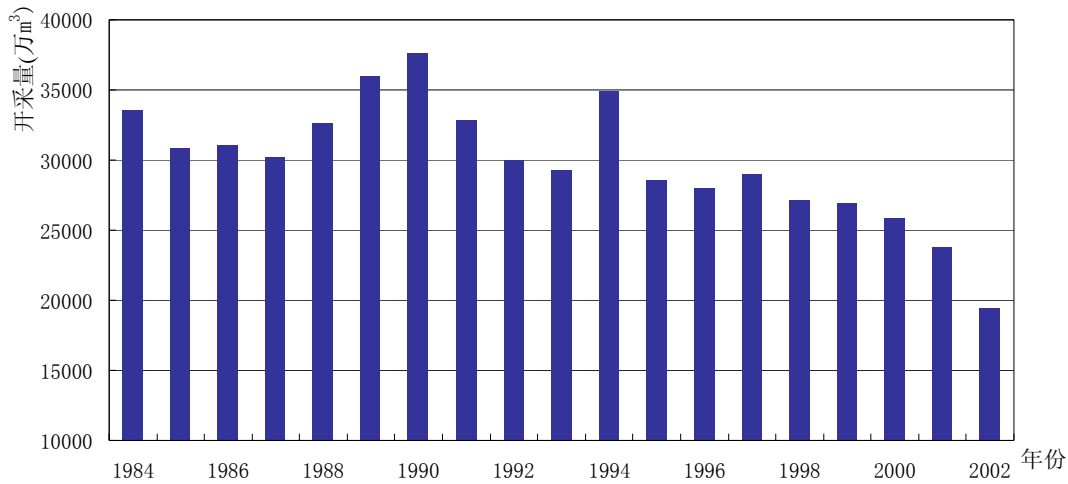


图2 大连市历年地下水开采量变化图

六十年代末期，开始采用浅层大口井灌溉，海水入侵现象开始出现，入侵面积逐渐增加，达到 50Km²，主要分布在大连湾沿岸，在金州西海头有零星分布。

七十年代，用水量不断增加，浅层大口井已不能适应工农业生产的需要，开始在滨海岩溶区采用钻机凿深井，井深一般在 50~60m左右，随着开采量不断增大，地下水降落漏斗开始形成并扩大，海水入侵面积也在不断扩大。1965~1977 年，海水入侵仅限于甘井子区南关岭和后盐村 2 个孤立地段，入侵距离 6.25Km，面积 14.5 Km²，氯离子含量增长 2~4.5 倍（1964 年以前，裂隙岩溶水中的氯离子含量小于 100mg/l）。到七十年代末期，入侵面积已达到 120.6 Km²，平均氯离子含量 362.5 mg/l。

八十年代，海水入侵进一步发展，并且达到了严重的程度。1984 年重点入侵地段有 9 个：南关岭、革镇堡、周水子、营城子、大连市区、大连经济技术开发区、金州、大魏家、大连泡，最大入侵距离 8.6Km，比 1981 年增加 44.92Km²，地下水位标高在海平面以下 4~20m，氯离子平均含量 722mg/l，比 1981 年增加 282mg/l，年均递增 94mg/l。1988 年海水入侵面积达 220.25Km²。

九十年代初，海水入侵面积进一步扩大，1989 年为 268Km²，比 1988 年增加 47.75Km²。1994 年是大连海水入侵发展史上最严重的一年，不论是海水入侵面积，还是氯离子含量都达到历史最高值，其中，枯水期海水入侵面积达 496.1 Km²，占整个大连市金州以南面积（2515Km²）的 19.7%，比 1992 年增加 196.1Km²，年递增 98.05Km²，平均氯离子含量 513.6mg/l，比 1992 年(457.8mg/l)增加 55.8mg/l，年递增 27.9mg/l。1994 年以后随着政府管

理力度的加强以及人们在思想意识上真正认识到海水入侵给工农业生产以及人们生活造成的危害，海水入侵状况有所好转，入侵面积总体呈下降趋势。

九十年代末，由于连续四年干旱少雨，局部开采量增大，导致海水入侵面积又有增大势头，但幅度较小，2001年和2002年海水入侵面积均为405.8Km²。2002年海水入侵面积详见图3。

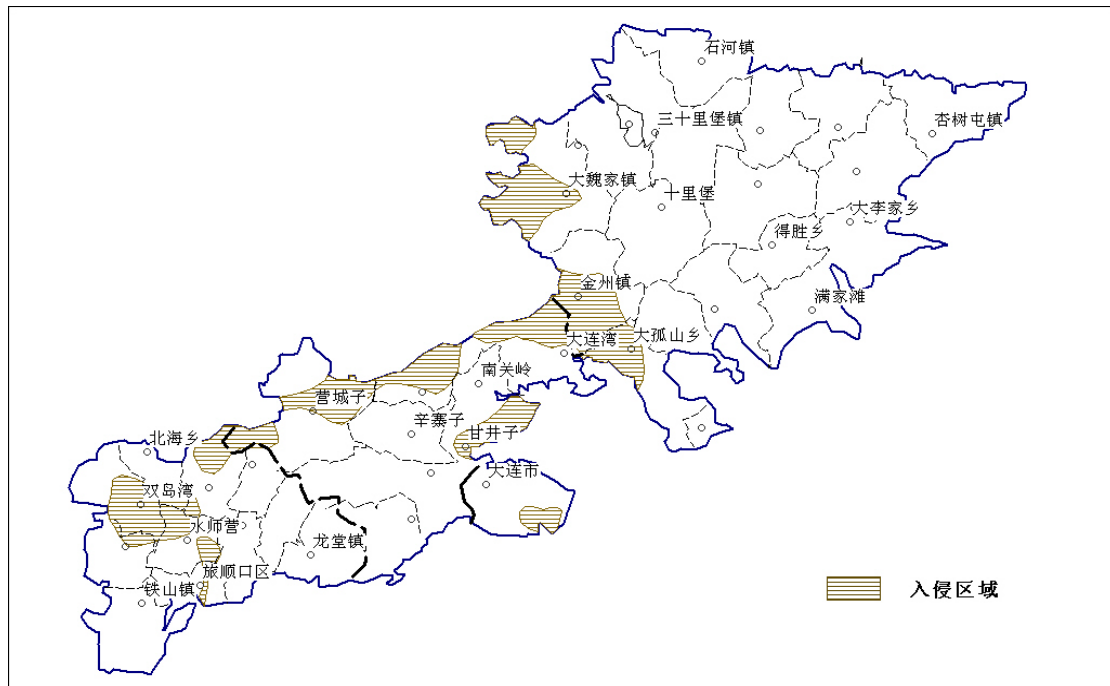


图3 2002年的海水入侵范围图

3. 海水入侵的成因及危害

3.1 海水入侵的成因

海水入侵必须具备两个条件，其一是水动力条件，其二是水文地质条件。这两个条件必须同时具备，才会发生海水入侵。这些自然条件为海水入侵提供了入侵途径和通道，控制着海水入侵的方向和程度。同时，人为的改变地下水动力条件也是发生海水入侵的主要原因。

3.2 海水入侵的危害

海水入侵给大连市的工农业生产和人民生活带来了很大的危害，现分述如下：

3.2.1 对工业生产的影响

改革开放以来，大连市的工业生产发展很快，老厂改造，新厂增加，工业产值不断提高，特别是大连经济技术开发区的兴建和发展，需要大量的淡水资源，海水入侵减少了可以利用的地下水资源，直接影响了企业的兴建和发展，有的厂矿已经兴建，由于无水而被迫停产和迁移。海水入侵严重的地段，恰恰是工农业建设比较集中的场所，由于水质恶化，直接

影响了工业产品的质量，如大连化工厂、氯酸钾厂、金光化工厂、大钢、石油七厂、造纸厂等大中型厂矿的自备井，因受海水入侵影响，锅炉管道及抽水设备严重腐蚀，损失很大。

3.2.2 对农业生产的影响

海水入侵严重地段主要分布在南关岭~泉水眼子菜区、营城子菜区、金州市区及郊区、大魏家菜地等地区。由于海水入侵，使地下水中氯离子含量不断增高，一般都在 500~1000mg/l，有的地段达 2000mg/l，长年用这样的咸水灌地，使土地板结，植物枯萎，连年减产或绝收，菜田面积逐年减少，蔬菜品质也大幅度下降。由于连年减产，只好改种抗盐叶菜或将菜田改为旱田及建筑场地，直接影响到大连市的菜篮子工程。

3.2.3 城乡供水井报废

由于地下水中氯离子含量已经大大超过了饮用水水质标准，致使一些水井报废，如 1994 年大魏家水源地有 9 眼井报废，南关岭地段有 2/3 的深井报废，金州城区内水质全部咸化，无法饮用，营城子菜区 70~80% 的深井也已陆续报废，严重影响了人民群众的生产生活。

4. 海水入侵与地下水位及开采量的关系研究

海水入侵与地下水位及开采量之间的相互关系，一直以来都是各国地下水领域专家、学者研究的重点，同时也是出现海水入侵的滨海地区各级政府的水行政主管部门和广大人民群众最为关心的问题之一。只有明确它们之间的相互关系，才能制定适宜的防治措施，确保当地经济的快速发展及人民的正常生活，因此，进一步丰富与完善海水入侵与地下水位及开采量的关系理论成为本次研究的一个重点内容。

4.1 海水入侵与地下水位的关系

由海水入侵机理可知，海水入侵是由于滨海地区地下水位下降，咸淡水界面之间的动态平衡被打破而出现的海水向陆地含水层入侵的现象，因此，地下水位降低是导致海水入侵的内在原因。

通过分析可以知道：即使是同一水位，在不同地区也会表现出不同的海水入侵程度，反之，海水入侵程度相同的不同地区，地下水位也会有所不同。因为即便地下水平均水位在满足一定的条件下，理论上可以达到控制和消除海水入侵的目的，但对于区域内具体的点就可能不适用，其水位可能低于地下水平均水位，也可能高于平均水位，低于平均水位的点仍存在海水入侵的可能，或本身已发生的海水入侵根本就没有因为平均水位满足条件而有丝毫消减的迹象。因此只有在充分考虑研究区地层岩性、地质构造、岩溶发育程度和开采性质及地下水开发利用程度的情况下，再从具体的观测点入手研究海水入侵与地下水位之间的关系

才更具有现实指导意义。

4.2 海水入侵与开采量的关系

众所周知，该地区的地下水位迅速下降是由于大量开采地下水所造成的，地下水位的快速下降，继而引起海水入侵，使地下水中 Cl^- 含量急剧增加。因此在海水入侵与开采量之间将存在正比关系，即增加地下水的开采就会加剧海水入侵。

海水入侵区开采量阈值是发生海水入侵的临界值，是地下水系统保护得以实施的关键。但该地区的地下水开采量大于开采量阈值时，就发生海水入侵，反之亦然。开采量阈值的准确程度直接关系到该地区是否能够做到地下水资源的可持续开发利用。

5. 海水入侵区地下水系统保护标准的确定与方法

5.1 保护标准

根据大连市海水入侵的现状就目前城市的供水状况，确定大连市海水入侵区的保护目标为：现状条件下，使海水入侵不再恶化，并有逐年减小的趋势，具体为：对已发生海水入侵且程度不太严重的地区，尽可能地恢复到未入侵时的状态（即 Cl^- 浓度小于等于背景值）；对海水入侵严重地区，使其海水入侵程度降级，由重度逐步降至中度，再降到轻度，最终恢复到未入侵前的状态。同时满足地下水系统遭受破坏后所造成的损害达到最小。

在满足大连市海水入侵区保护目标的基本前提下，结合此次研究结果，认为：在尽可能减轻海水入侵危害程度和满足经济社会发展对地下水资源需求的同时，海水入侵区地下水系统的保护标准为：地下水开采量应低于开采量阈值，水位应高于地下水水位阈值。针对不同入侵程度的海水入侵区，地下水开采量阈值和地下水水位阈值的确定标准不同：已发生海水入侵且不太严重的地区，取用标准为 Cl^- 浓度小于等于背景值；对海水入侵严重地区，需根据研究区具体情况，首先确定符合实际的保护目标，再由此给出合理的地下水开采量阈值。

5.2 保护标准的确定方法

本次采用人工神经网络方法和遗传算法来确定大连地区海水入侵区的开采量阈值。

5.2.1 人工神经网络方法

该方适用于输入量与输出量之间存在某种特定的关系，这种关系很难用简单的数学方程式加以描述，是高度的非线性关系。本研究中通过对海水入侵区地下水 Cl^- 浓度、海水入侵面积、地下水的开采量和相应地区的降水量进行分析，发现海水入侵区地下水的 Cl^- 浓度和海水入侵面积明显地受控于该地段的地下水开采量和降水量，而他们之间的关系又非简单的数学方程式所能表达，为此，根据已有资料及海水入侵情况，选择典型区域为研究对象，

建立了人工神经网络模型。具体为选择地下水开采量和降水量作为BP网络模型的输入单元，地下水的Cl⁻浓度和海水入侵面积作为其输出单元。该网络模型的中间隐含层单元数由计算时网络模型的误差下降情况来确定。

此方法中海水入侵面积、地下水开采量及降水量均针对研究区整体而言，所需Cl⁻浓度为研究区的平均值，但在资料相对较少的情况下，可取用几个有代表性观测点的平均值，或选用某一具有代表性观测井的资料。

以甘井子区为例，选用了 1984~1994 年甘井子区地下水开采量和相应地区的降水量、地下水中Cl⁻浓度和海水入侵面积资料的 11 个样本，对网络模型进行训练，形成了由两个输入单元，对应于地下水开采量和降水量；七个中间隐含单元和两个输出单元，对应于地下水中Cl⁻浓度和海水入侵面积组成的三层网络模型（图 4）。

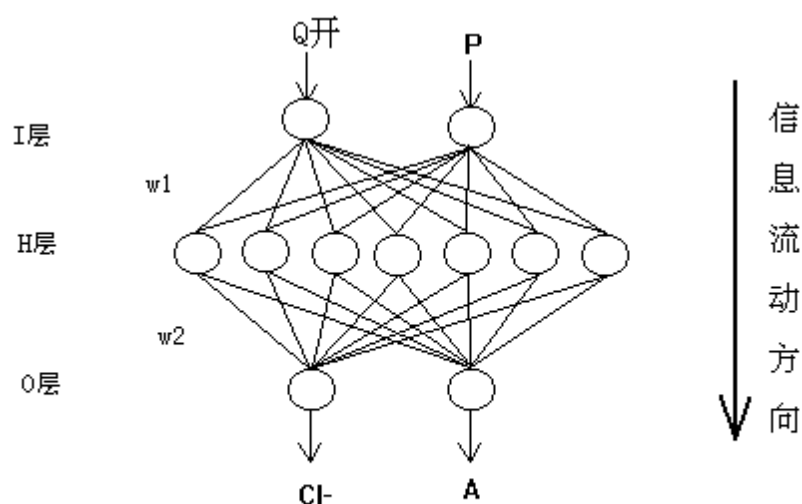


图 4 甘井子区地下水开采量阈值计算的神经网络模型

图中符号说明：

Q_开--- 甘井子区地下水开采量($\times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$);

P --- 甘井子区降水量 (mm);

Cl⁻--- 甘井子区地下水中Cl⁻ 浓度(mg/l);

A--- 甘井子区海水入侵面积 (Km²);

对上述所形成的由两个输入单元，对应于甘井子区地下水开采量和降水量；七个中间隐含单元和两个输出单元，对应于甘井子区地下水中Cl⁻浓度和海水入侵面积组成的三层网络模型，采用 1984~1994 年甘井子区地下水开采量和相应地区的降水量、地下水中Cl⁻浓度

和海水入侵面积资料的 11 个样本，对网络模型进行训练，并用训练后的网络模型预测降水量取多年（1984~1995 年）平均值 604.9mm 时，不同开采量条件下，甘井子区地下水中 Cl^- 浓度和海水入侵面积，根据预测结果，甘井子区地下水中 Cl^- 浓度和海水入侵面积的变化情况可知，当地下水的开采量超过 $3000 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 时，该地区的海水入侵面积和地下水中 Cl^- 浓度都将急剧上升，由此，确定该地区的地下水开采量的阈值为 $3000 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$ 。

5.2.2 遗传算法的 MATLAB 实现

Cl^- 浓度和开采量总的变化趋势为：开采量增加 Cl^- 浓度也增加，开采量减小则 Cl^- 浓度也减小，充分说明了该区地下水中 Cl^- 浓度明显受控于地下水的开采量。虽然理论上大气降水也会对 Cl^- 浓度造成影响：降水量增加， Cl^- 浓度减小，反之，降水量减小，则 Cl^- 浓度增加，降水量和 Cl^- 浓度不一定是一一对应关系，说明大气降水只在某种程度对 Cl^- 浓度有影响，但不起决定性作用。因此，只需建立地下水中 Cl^- 浓度与开采量的关系方程即可满足建模需要，其模型的一般形式为：

$$\text{Cl}^- = f(Q) \quad (1)$$

可具体写成如下的地下水 Cl^- 浓度模拟模型：

$$\text{Cl}^- = A_1 + A_2 Q \quad (2)$$

式中符号说明：

A_1 、 A_2 —模型待估参数；

Q —开采量（ 万m^3 ）；

为了进一步分析地下水中 Cl^- 浓度与其影响因子之间是否存在非线性关系，此次研究又建立了一元对数方程，模型的一般形式为：

$$\text{Cl}^- = A_3 + A_4 \ln(Q) \quad (3)$$

式中符号说明：

A_3 、 A_4 —模型待估参数；

Q —开采量（ 万m^3 ）；

可以用 MATLAB 遗传算法分别对上述(2)和(3)两模型的待估参数进行识别。经计算，确定的待估参数分别为： $A_1 = 216.09$ ， $A_2 = 0.27408$ ， $A_3 = -4817.4$ ， $A_4 = 734.75$ ，由此，得到如下的水质模拟模型：

$$\text{Cl}^- = 216.09 + 0.27408Q \quad (4)$$

$$Cl^{-} = -4817.4 + 734.75 \ln(Q) \quad (5)$$

另外，用 Data Processing System（简称 DPS）统计分析软件分别建立形如 (2)和(3)式的回归方程，其中建立对数方程时需先对开采量对数处理后，才能应用 DPS 直接计算。最终求得的回归方程如下：

$$Cl^{-} = 215.52 + 0.2743Q \quad (6)$$

$$Cl^{-} = -4996.5 + 757.14 \ln(Q) \quad (7)$$

6. 大连市海水入侵防治对策

大连市出现海水入侵地质灾害，最主要是不合理开采地下水所致，而地下水补给量的减少，则对海水入侵起到加速作用。保护好大连市地下水资源，防治海水入侵，必须从大连市的具体地质、水文地质条件、地下水开采现状及水资源状况等实际情况出发，确定有效的保护方法，才能防止海水入侵的发展，做到地下水资源的可持续开发利用以支持该地区经济社会的可持续发展。

6.1 开源节流

因地制宜，采取措施，增加地下淡水补给量；加速实施引水工程，实施地下水和地表水联合供水。

节约用水；控制和调整地下水开采；近海控制开采；调整开采时间和间隔调整开采井布局和水井密度

6.2 阻拦海水入侵的水利设施

修建地表防潮设施及防暴堤；修建地下水库和地下防渗阻咸帷幕；敷设地下抽水槽与回灌井。

6.3 适应性生态改良措施

适应性生态改良是指为适应海水入侵现状，进行海水入侵区内生态改良实验，利用地下微咸水或与淡水混合利用浇灌耐盐作物，发展入侵区经济。原则上根据海水入侵区具体的海水入侵现状、发展趋势、地表景观，采取统筹规划分区治理的方法，由海岸向内陆腹地分区开发利用。

Research on the Standard and Its Determination Method of Groundwater System Protection in Seawater Intrusion Region, Dalian City

Jing Yandong¹, Li Zhongguo², Shu Longcang¹, Li Yange³

1. College of Hydrology and Water resource, Hohai University, Nanjing Jiangsu, 210098

2. Hydrology and Water Resource Investigation Bureau, Liaoning Province, Shenyang, 110003

3. Laboratory of Hydrology and Water Resource of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu, 210098

Abstract:

Seawater intrusion is one of the environmental problems in coastal regions. As early as 1964, seawater intrusion of our country was first detected in littoral area of Dalian, and up to the present, not only the economic development of Dalian City but the daily life of local people was seriously impeded by seawater intrusion. It thus is of great practical value to propose the standard of groundwater system protection in seawater intrusion region. In this paper, the study was progressed from the following aspects: ① it was thoroughly and systematically analyzed the status quo, inducement and the harm of seawater intrusion; Total salted area is up to 405.8 km² in 2002, with a character in vertical direction of increasing salinity with depth and stratification; Two prerequisites to seawater intrusion are hydrogeology and hydraulic dynamic conditions, which will result in seawater intrusion only when both conditions exist; Industry and agriculture, eco-environment and physical health of local people was to different extent affected by seawater intrusion. ② The theory of relationship between seawater intrusion and groundwater level and pumping rate was enriched: decrease of groundwater level is the intrinsic inducement of seawater intrusion, and the analysis on relationship between seawater intrusion and groundwater level is reasonable only based on fully consideration of lithology of strata, geologic structure, develop degree of karst and pumping condition as well as the specific observation points; there are direct proportion between seawater intrusion and groundwater level, and the increase in groundwater pumping will aggravate the seawater intrusion. ③ The standard of groundwater system protection in seawater intrusion region was proposed, that is: to release the harm of seawater intrusion as much as possible and meet the needs of groundwater resource to development of economy and society, meanwhile the groundwater pumping rate should less than its threshold and groundwater level higher than its threshold. ④ Based on the dynamic groundwater observation data and geologic and hydrogeologic condition of Dalian City, the ANN (Artificial Neural Network) and genetic algorithm were proposed as the determination method of groundwater system protection in seawater intrusion region. With these two methods respectively, the pumping rate threshold of Ganjingzi region is evaluated as $3000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, and that of Lushunkou region is $1264 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$. ⑤ The prevention and recovery measures of seawater intrusion was brought forward according to local conditions,

Key words:

Dalian City, Seawater Intrusion, Groundwater System, Protection Standard, ANN (Artificial Neural Network), Genetic Algorithm, Prevention and Recovery Measures