

# 北戴河地区海水入侵含水层系统改造分析\*

许广森 (中国市政工程华北设计院)

北戴河是全国著名的避暑疗养胜地,每年旅游人数近十万人,随着北戴河地区城市开发建设及旅游事业的振兴,需水量越来越大,预计2000年需水二千万方。目前主要水源取自滨海含水层地下水,开采井群位于距海边线约4公里的某村。抽取地下水供水廿余年表明:近年开采已超过设计允许开采量十多倍,过量集中开采的结果形成区域降落漏斗,引起海水倒灌入侵了含水层。造成水源井报废,稻苗死亡,水质恶化。为了解决北戴河地区近期缺水危机,拯救已污染的供水水源地,对水源地的系统改造和再生可能性进行了系统方法研究。

## 一、形成海水侵入含水层的原因

北戴河水源地位于冀东洋河冲洪积扇的前缘,南邻渤海西北海面。受区域地质控制,可开采含水层仅为第四系孔隙水,厚20—40米由砂砾石层组成,透水性较好渗透系数为13—20米/日,基底为花岗岩混合岩。地势由内陆向海边倾斜,地下水主要补给来源为降水、地表水渗漏与侧向补给。

从1959年某村建成水源井,农灌井逐年增多,以水源地为中心凿井密度达到每平方公里22眼,地下水抽水量每年高峰期(5—9月)可达40万米<sup>3</sup>/日。1969年以后洋河水库建成的截流,使地表河沟除北戴河尚存少量径流外均呈断流状态,特别是1981—1982年华北地区严重干旱造成水库空库。在水资源缺乏统一管理情况下,北戴河地区对水源地采用过量集中的强行开采方式,因而形成区域降落漏斗如图1,当开采漏斗扩展至海岸或倒灌河沟边时形成海水向含水层的直接侵入。海水位与地下水位关系如图2。渤海海潮为不规则全日潮海水的动态变化使海水入侵方式有所不同,涨潮时海水沿河倒灌和一般的岸边入侵,前者可直抵水源井威胁最大。二者构成滨海含水层开采状态下海水入侵两种类型即线状与面状入侵。

由表1各因素分析可见造成北戴河水源地海水侵入主要因素是海水与地下水水位差和开采量,而水位差则往往是由于水资源管理不善或自然调配不均衡而引起的后果。

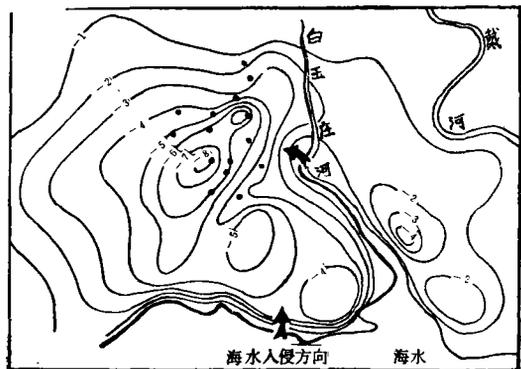


图1 北戴河水源地地下水降落漏斗分布图

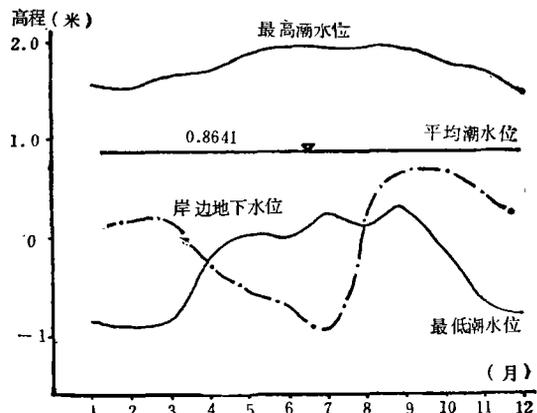


图2 海水位与地下水位关系图

表1 海水入侵范围与控制因素关系

时 间	开 采 量 万米 <sup>3</sup> /月	海水地下 水水位差 $\Delta H$ (米)	海水入侵 量 万米 <sup>3</sup> /日	入侵面积 (Km <sup>2</sup> ) >1g/l	海水 Cl <sup>-</sup> (g/l)	地下水 Cl <sup>-</sup> (g/l)
84.2	15.5	1.86	0.05	3.07	21.3	0.209
84.8	60.0	8.86	1.72	5.92	17.9	4.41

## 二、海水污染含水层的程度评价

海水污染含水层主要标志是地下水中氯离子和含盐量增高,含盐量S与氯离子Cl<sup>-</sup>呈线性相关关系,所

以海水入侵污染为单项污染。根据国家供水标准氯离子适量为200mg/l, 最大允许浓度为600mg/l 规定用环境质量系数(实际浓度与背景比值)将调查区污染状况分级如表2。编出海水侵入北戴河水源地污染程度图3。

表2 北戴河水源地海水污染程度分级

污染程度	级别	背景比系数	侵占面积(%)
未受污染	I	<1	16.9
微污染	II	1—1.5	19.5
中等污染	III	1.5—4.5	26.1
重污染	IV	>4.5	37.5

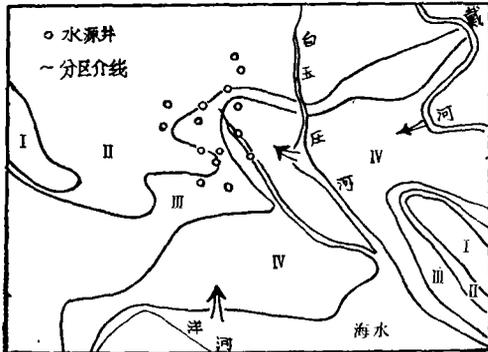


图3 北戴河水源地海水入侵污染程度图

图3表明水源地已受到海水不同方向的侵入污染。用46眼检查井统计, 地下水已发生了水质变异, Na/Cl 系数增长31%; Ca/Cl 增长93%, 水化学类型已由HCO<sub>3</sub>-Na·Mg变为Cl-Ca·Mg型。8月份比2月份增高21倍。经计算目前海水入侵量已占地下水总补给量20%。侵入峰面正以49米/年速度向水源地推进。

为了进一步估计海水入侵程度, 进行了野外和室内计算参数的测定试验外, 采用有限单元法耦合求解了地下水位和水质弥散数学模型得出矩阵预测方程:

$$\left( [K] + \frac{[D]}{\Delta t} \right) \{h\}_{t+\Delta t} = \left( \frac{[D]}{\Delta t} - [K] \right) \{h\}_t + \{F\}_t \quad (1)$$

$$\left( [G] + \frac{[P]}{\Delta t} \right) \{C\}_{t+\Delta t} = \left( \frac{[P]}{\Delta t} - [G] \right) \{C\}_t + \{Fc\}_t \quad (2)$$

其中: [K]、[G]为渗透和弥散系数矩阵;  
[D]、[P]为给水度和对流系数矩阵;

[F]、[Fc]为已给定流量及通量矩阵

假定水源地保持目前开采水平, 考虑气象、海水位周期变化, 采用序列相关第一和第三类边值条件, 以1984年为初值进行了预测计算如图4。表明该水源地如不采取措施, 海水入侵量将逐年增加如图5, 至1990年将全部为海水所污染。

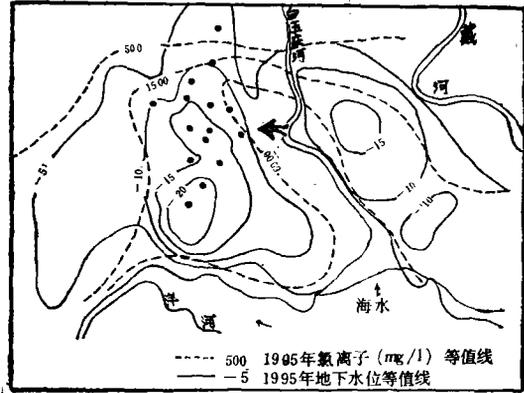


图4 北戴河水源地1995年预测计算等值线图

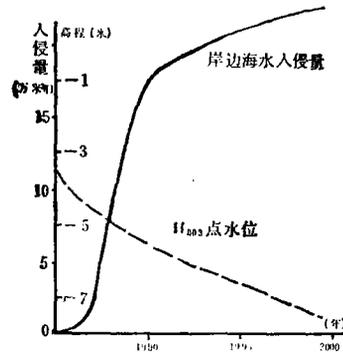


图5 北戴河水源地海水入侵量预测计算曲线

### 三、系统改造盐化含水层的可能性分析

北戴河水源地虽然已发生海水侵入含水层和水质变坏现象, 但经调查认为尚存在含水层改造和再生的可能条件。

(一) 地表水尚未充分利用, 北戴河水源地西有洋河, 东有戴河。洋河水库位于上游19公里处, 水库调节库容为3.53亿米<sup>3</sup>, 平均年弃水量0.68亿米<sup>3</sup>, 戴河多年平均径流量为0.5亿米<sup>3</sup>, 丰水期流量达430米<sup>3</sup>/秒, 全部弃入大海。这些地表水完全可用来建立地下水水库, 实施以丰补淡、以淡驱咸的联合治采措施。

(二) 该地具有发展地下水水库的条件, 由于含水层透水性较好, 厚度由北而南增大, 倾斜的不透水底板为改变海水的侵入方向提供了水文地质基础。据调

查目前区域开采漏斗中心为-8米,疏干漏斗约2亿米<sup>3</sup>。地面河渠纵横,水利条件具备,同时地势北高南低,有沟谷两条,经过工程处理可变为淡水湖,为含水层回渗补给有了来源。

(三) 现有农井灌网为实施井灌并排以淡驱盐改造含水层工程提供了方便。经统计该地农灌井约520眼,当农灌由井灌改为渠灌时,可以充分利用现有井群进行含水层灌排改造工程,可大大节约投资。

#### 四、系统改造方案及效果

洋河水库Q与地下水G组成联合开采系统模式(见图6)。取洋河水库调节库容为L,蓄水量为Q<sub>i</sub>,当y<sub>i</sub>>L-(Q<sub>i</sub>-X<sub>i</sub>)产生放水策略R<sub>i</sub>=h<sub>i</sub>+K<sub>i</sub>及W<sub>i</sub>有:

$$R_i = Q_i + y_i - X_i - L$$

$$0 \leq R_i \leq \min(Q_i, X_i)$$

$$0 \leq W_i \leq \min(L, X_i)$$

当取G决策变量为Δq<sub>i</sub>,状态方程为:

$$\mu \Delta H = (R'_i - E_i - V_i) \Delta t - \Delta q_i \Delta t \quad (3)$$

其中: R'\_i = α(R<sub>i</sub> + P<sub>i</sub> + Z<sub>i</sub>)

α为入渗系数 i=1...n 时段

令R'\_i - E\_i - V\_i = B<sub>i</sub> 设地下水G时段蓄水和有效蓄水体积为V<sub>i</sub>、V<sub>0</sub>。则得约束条件为: β<sub>i</sub> ≤ V<sub>0</sub>。

$$\sum_{i=1}^n \beta_i - n \bar{\Delta q}_i < V_i - V_0$$

$$\Delta q_i > 0 \quad V_i > 0 \quad E_i > 0 \quad R'_i > 0$$

求解目标函数

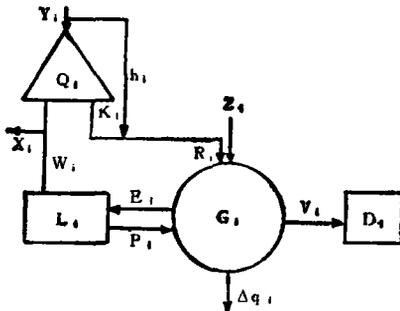


图6 系统示意图

Q<sub>i</sub>—为洋河水库的调节库容; G<sub>i</sub>—为含水层蓄水量; D<sub>i</sub>—为供水量; L<sub>i</sub>—为农灌用水量; K<sub>i</sub>—为洋河水库弃水量; h<sub>i</sub>为戴河径流量; R<sub>i</sub>—为回灌补给能力; y<sub>i</sub>—为地表水入库量; Z<sub>i</sub>—为含水层天然补给量; E<sub>i</sub>—为无地表水时向L<sub>i</sub>输入地下水能力; W<sub>i</sub>—为由水库引灌地表水向L<sub>i</sub>过水能力; V<sub>i</sub>—为水源井群向D输水能力; P<sub>i</sub>—为农灌水回渗量; X<sub>i</sub>—为水库Q向其他地区放水量; Δq<sub>i</sub>—为余水驱咸水能力

$$f(\Delta q_i) = \max \left\{ C_i \Delta q_i + \sum_{j=1}^m \beta_{ij} v_i \right\} \quad (4)$$

这里m为方案数取1, C<sub>i</sub> v<sub>i</sub>为改造含水层及输水供水平均效益价格系数。可输入各概算数。式内W<sub>i</sub>>0时E<sub>i</sub>=0; W<sub>i</sub>=0时E<sub>i</sub>>0。式(6)求解框图如图7。

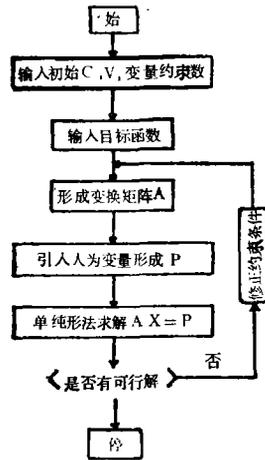


图7

以1972年至1982年洋河水库实际数据, 求出50%保证率下当V<sub>i</sub>=0.03亿米<sup>3</sup>/年时Δq<sub>i</sub>为0.09亿米<sup>3</sup>/年。用此挤排入侵海水改造含水层, 约需4—6年左右可能使水质得到改善。为实施方案提出建议: (1) 停开部分农井, 改井灌为渠灌。(2) 修筑拦潮坝降海水入侵强度。(3) 将弃水引入含水层。(4) 实行渠灌井排、冬蓄夏采, 合理分配水资源。

1984年底本工作报告提交后, 秦皇岛市立即对建议第一项即整修灌渠, 停井灌改为渠灌进行了安排。从1985年5月至8月引洋河水库水以250万米<sup>3</sup>输入枣园向含水层引渗。据回访: 8月份水源井开采量比去年同期增加约35.5%, 而地下水位明显上升, 开采漏斗已正在恢复状态, 预估来年再增加开采量大有帮助。农业收益最大, 85年没有出现稻苗死亡现象, 长势极好, 估计可比1984年增产1.3成。改造初获成效, 深受农民欢迎如图8。只是由于将全部农井停开, 水源井氟离子含量尚未明显下降, 有待进一步执行排灌结合, 加强排咸能力措施, 使地下水形成以淡驱咸的水循环, 将会进一步获得更大效益。

北戴河水源已经受到海水侵入污染, 其污染程度尚属初始较轻阶段, 如果不迅速采取措施, 将发展为预测的严重后果。系统工程方法为改造含水层使其

(下转第61页)

敬告读者

为了更好地为水文地质工程地质事业服务，经批准，本编辑部在努力办好《水文地质工程地质》期刊的同时，增编《水文地质工程地质论丛》（第一辑已出版）和《水文地质工程地质选辑》，暂为不定期出版，由新华书店发行。

《水文地质工程地质》自复刊以来，一直得到广大读者的支持和爱护，对此，我们十分感谢。根据读者的意见和要求，并基于《论丛》和《选辑》的编辑出版，拟加强期刊应用方面的内容；适当增多技术性文章的选登；增大信息量，从而使版面更加活跃。

《水文地质工程地质论丛》是综合性、学术性的论文集，侧重反映有关的理论研究成果，（包括有关基础学科和边缘学科的学术论文）。《论丛》除按《水文地质工程地质》的投稿要求征文外，来稿请附中、英文摘要（一般不超过500字），文章的题目、工作单位、作者（汉语拼音）均请译出。论文一般要求不超过10,000字（包括插图和附表），来稿请注明“论丛稿件”。

《水文地质工程地质选辑》是围绕某一方面或某一课题中心来组织文章，系1974年开始编辑出版，已发行了廿一辑，从廿二辑开始，由本编辑部负责编辑。

我们希望，由《水文地质工程地质》、《水文地质工程地质论丛》和《水文地质工程地质选辑》组成的集刊系列，在互相补充和配合的前提下能不断形成和发挥其各自的特点，更好地满足广大读者的需要。

我们将竭尽全力，在广大读者的支持和关怀下，努力做好工作，不断提高集刊的质量。

《水文地质工程地质》编辑部

第一辑目录

- 论大骨节病克山病与水文地球化学的密切关系及其病因与防治问题（方鸿慈）
- 空间地质信息在平面上的表示（王明德）
- 渗透度张量（田开铭）
- 大单元技术及其在双重介质模型和溶质运移问题中的应用（胡尊国等）
- 结晶岩体的水跃现象及其在地下水封石洞油库中的作用（徐绍利等）
- 黄土层地下水向井流动的特征及参数确定方法的研究（曲焕林等）
- 太原西山基岩地下水化学成分的起源和演化（王怀颖等）
- 衰减水文过程线的拟合（郭映忠）
- 斜坡岩体变形的基本地质力学模式（王兰生等）
- 论中国湿陷性黄土结构的形成和发展（高国瑞）
- 不同荷载作用下的土岩体微结构研究（张梅英等）
- 粘性滑带土剪切过程中结构变化与抗剪强度的关系（湛壮丽等）
- 刘家峡大坝左岸边坡岩体中断层泥的研究（严润娥）
- 铜街子水电站坝基软弱夹层的性状及其工程评价（潘培才等）
- 水对岩体软弱夹层力学特性影响的探讨（相建南）
- 粘性土显微结构鉴定及其工程地质意义（阎世骏）
- 土工试验和原位测试计算模量理论公式（陈雨孙等）
- 粘性土结构特征的研究方法与问题（王幼麟）

（上接第9页）

再生提供了理论依据。采用地表水与地下水联合治采方案是比较现实和经济的，本文所提改造方案具有投资少、收效快，充分利用水资源的优点，待今后进一步验证后，可以作为滨海含水层海水入侵系统工程应用的一例。

参考文献

- 〔1〕 N伯拉斯“水资源科学分配”，1983，水力电力出版社。
- 〔2〕 余芸生“系统分析”，1981，华北水利电力学院。
- 〔3〕 许广森“地下水资源系统评价方法初步探讨”，1982，工程钻探（1）。

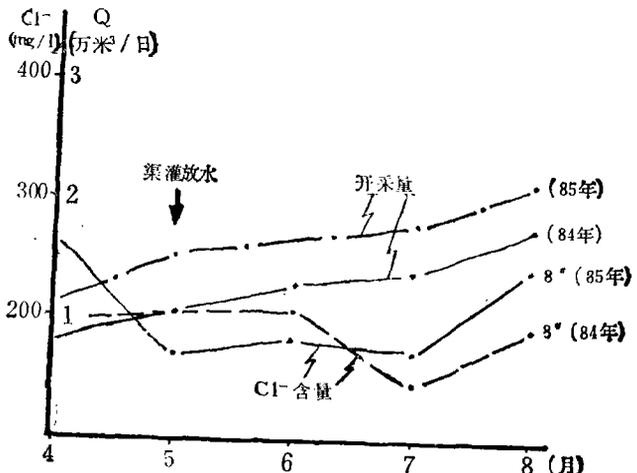


图8 引灌地表水1984年—1985年同期效果比较