

# 潍河下游平原咸水入侵监测研究

杨丽原<sup>1,3</sup>, 张祖陆<sup>2</sup>, 沈吉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 山东师范大学 地理系, 山东 济南 250014;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 咸水入侵作为研究区内的一种环境灾害, 严重影响了当地的社会、经济和生态环境的建设。通过对研究区影响咸水入侵的因素分析, 从宏观、中观和微观 3 个方面对咸水入侵动态变化进行了监测, 并对监测结果进行了分析。结果表明, 地下水位和水质的变化可以作为咸水入侵的指示标志。监测网系统的建立为咸水入侵区的灾害治理提供基本信息和依据。

关键词: 咸水入侵; 动态监测; 潍河下游平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2002)06-0048-04

中图分类号: X522

## A Study on Dynamic Monitoring of Saltwater Intrusion on Lower Reaches of Weihe River

YANG Li-yuan<sup>1,3</sup>, ZHANG Zu-lu<sup>2</sup>, SHEN Ji<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. Department of Geography, Shandong Normal University, Ji nan 250014, China; 3. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** Saltwater intrusion arisen in the lower reaches of the Weihe river has drastically devastated the regional economy, society and ecological environment. Based on deeply analyzing the mechanism of saltwater intrusion and the groundwater regime regularity. The scientific monitoring method of saltwater intrusion regime and the layout of monitoring network are probed into. Three kinds of monitoring network are constructed (1) the monitoring network of the water resources supplies and demands; (2) the monitoring network of groundwater table and quality regime; (3) the monitoring network of geophysical methods.

**Keywords** saltwater intrusion; dynamic monitoring; the lower reaches of the Weihe river

莱州湾南岸潍河下游平原是山东省重要的农业区,也是我国典型的咸水入侵区。20世纪70年代中期以来,随着社会发展,需水量急剧增加,地表水严重缺乏,地下水过度超采,陆地淡水区地下水位下降,导致近海平原地下地质时期赋存的卤水越过原始咸淡水界面侵染淡水含水层(即咸水入侵),极大地破坏了当地的社会、经济和生态环境。针对日益严重的咸水入侵灾害,本文通过对研究区影响咸水入侵的因素分析,认为应从宏观、中观和微观上3个方面对咸水入侵动态进行监测,并布设咸水入侵监测网。

研究区(图1)地势南高北低,自南部山丘区向北部莱州湾和缓倾斜。自晚更新世以来经历了3次海平面升降,形成了海陆交互相沉积,同时也形成了巨厚地下埋藏卤水体,成为咸水入侵的发生源。潍河冲洪积扇及其以下的众多古河道及其砂砾层既是淡水主要储水层和补给通道,又是咸水入侵的地下通道<sup>[1]</sup>。

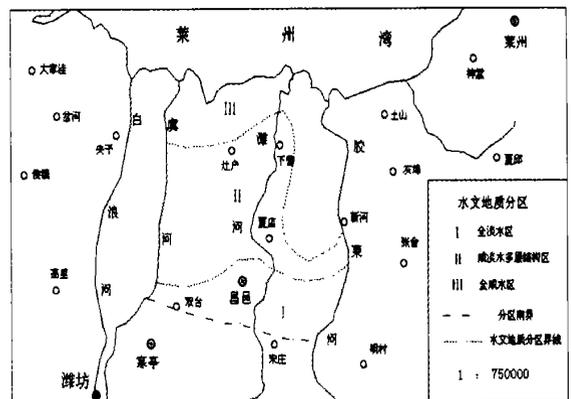


图 1 研究区的位置及水文分区

全区水资源主要依靠天然降水,客水资源量少。地下水超采严重,地下水位急剧下降,形成地下漏斗,使咸水水头压力大于淡水层,咸水沿着古河道砂层,地下强透水层渗入内陆地下淡水层,这样在潍河下游

收稿日期: 2002-06-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(49871011); 中国科学院南京地理与湖泊研究所知识创新课题(CXNIGLAS-A02-04)

作者简介: 杨丽原(1970-),男(汉族),山东滕州人,在读博士,研究方向为环境演变与灾害研究工作。电话(025)7714639-816 E-mail: yangly@niglas.ac.cn

滨海平原形成 3 个水文分区: 淡水区、咸淡水过渡区及咸水区。

据“八五”期间和近几年研究结果表明<sup>[2,3]</sup>, 研究区咸淡水过渡区是一个不稳定的界面, 且呈箭头状指向海岸, 这是由于淮河河水对咸淡水界面的顶托作用的结果。

## 1 监测因素分析

### 1.1 水资源供需平衡

咸水入侵灾害发生的根本原因是区域水资源的短缺和过度开采所造成的, 水资源的平衡调节对其发生和变化有着宏观的调控作用。因此, 研究区水平衡分析是宏观控制和监测海水入侵的一项重要工作。只有通过供需水平衡分析才能知道某地区是否缺水以及缺水的程度如何, 为咸水入侵研究及水资源的合理利用提供科学依据。每年根据预测降水量和区域年度社会经济发展目标, 就可以对全年的水资源平衡状况作出预测, 从而对咸水入侵状况作出判定和预警。

### 1.2 咸淡水界面的电性特征

研究区地层电阻率的变化主要与地下水化学成分及矿化度有关。其关系式为:  $d_w = A_c \cdot C^{-1}$ , 其中:  $A_c$  为与地下水化学成分有关的系数 (由于咸水的化学成分在一定的范围内比较稳定, 故  $A_c$  变化不大);  $C$  为地下水矿化度。从上式中可以看出, 地下水矿化度与地层电阻率呈负指数相关。在咸水入侵区, 地层的电阻率一般呈渐变状态, 到了咸淡水界面附近, 由于地下水含盐量迅速减少, 电阻率增加幅度特别大, 所以在电阻率剖面曲线上普遍表现为台阶状突变变化的特征<sup>[3]</sup>。因此可以通过咸淡水界面的电性特征来监测咸水入侵。

### 1.3 地下水位、水质因素

咸水入侵直接原因是因为地下淡水水位的降低, 水头压力减少。地下水位下降表现为区域地下水位负值区面积的扩大, 即地下水位降落漏斗的扩大与加深, 这直接制约着咸水入侵发展。因此, 分析地下水位的变化的规律, 可以预测咸水入侵的动态变化状况。

天然地下淡水化学成分以碱土金属和重碳酸盐 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 为主, 矿化度小于  $1\ 000\ \text{mg/L}$ 。而在研究区, 咸淡水过渡带地下水系统由于受咸水入侵的影响, 水中  $\text{Cl}^-$  和碱土金属含量增加, 碱土金属和  $\text{HCO}_3^-$  的百分含量相对降低。而在咸水区水中的  $\text{Cl}^-$  离子快速增长, 形成  $\text{Cl}^- \text{Na}$  型水。因此, 全区的地下水化学类型具有自南而北由  $\text{HCO}_3$  型  $\rightarrow$   $\text{HCO}_3 - \text{Cl}$  型  $\rightarrow$   $\text{Cl} - \text{HCO}_3$  型  $\rightarrow$   $\text{Cl}$  型顺序变化的分布规律<sup>[4]</sup>。这种分布规律, 反映出地下水质的变化与咸水入侵的相

关关系。所以设立地下水化学动态监测剖面, 可以监测咸水入侵动态变化。

## 2 监测网的设计

咸水入侵监测网的布设是一个系统工程。首先, 从宏观上要对区域水资源供需量进行分析, 对逐年的水资源平衡状况作出宏观预测, 从而对咸水入侵状况作出判定和预警; 其次, 从中观上据咸淡水界面的运移特征及咸淡水电性, 利用地球物理方法作出咸水入侵状况的分析; 最后, 据不同水文区的监测井, 从微观上对地下水位、水质进行监测分析, 从而更精确地跟踪地下水文的动态状况。由此, 按照“点面结合, 重点控制”的原则, 布设监测网见图 2。

### 2.1 水资源供需监测网

水资源供需分析所需供水量、需水量及其各子项数据来源于昌邑市政府计划部门以及研究区的水文监测站、气象站、各个乡镇、村、工厂等单位的统计数据, 这些统计数据由水利部门输入计算机系统计算、分析。因此水资源供需监测网是一个广布研究区的宏观性的监测网。

### 2.2 物探监测网

为系统研究咸水入侵过渡带的时空变化规律, 沿咸水入侵方向, 在典型地段分别布设了 10 条近似垂直于海岸带、跨越数年咸水入侵区的电测监测剖面 (见图 2)。各剖面之间大致等间距, 每条剖面长  $7\ 000 \sim 8\ 000\ \text{m}$ , 测深点间距为  $1\ 000\ \text{m}$ , 且至少有 8~12 个测深点。测深点的选取一般在界面附近密, 远离界面稀疏, 布极方向要平行于咸淡水界面。

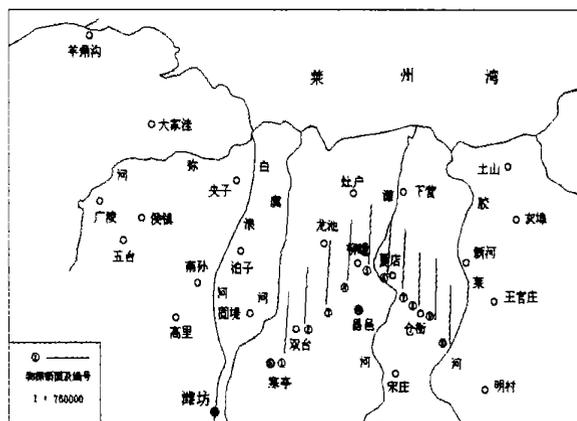


图 2 物探监测网

实际工作采用对称四极电测深法, 供电电极根据研究区的基岩埋深情况, 一般选  $AO = 170\ \text{m}$ 。每年进行了 2 次电测监测, 时间选择在每年的 6 月和 12 月。

### 2.3 地下水动态监测网

本项研究主要采用大范围水质调查与典型地段

常年定点水质、水位监测相结合,面上分析与点上分析相结合的技术路线,构建地下水水质、水位监测网。

点上的分析是在典型地段设置了 4 条监测剖面。监测井剖面的布设以研究区古河道分布关系为基础。每个监测剖面布设 5~8 个监测井位。这些点位的选择特别注意了要在不同方面具有代表性和典型性。除了在地理位置上能较均匀分布外,各监测点在水质类型上分别代表咸水、微咸水和淡水。在咸淡水过渡带加密了样点数,逐月监测。

本次研究过程中,选择了其中的一条典型古河道剖面的 5 个井位进行每半个月监测 1 次,连续监测 1 a。面上的分析是在咸淡水过渡带上选取 100 口以上的民用井监测地下水的水位和矿化度,民用井取水面广,易于掌握面上水质变化,亦可以掌握和了解咸淡水界面的波动情况。在用途方面包括饮用水、灌溉水、

工业用水及废弃咸井水。在每年旱季或雨季进行了 1~2 次全面的采样分析,配合物探监测网,以控制全区咸水入侵的范围变化状况。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 水资源供需分析

水资源供需量计算要考虑各种可能的供水水源及各类需水要求,供需水状况不但在地域分布上有所不同,在时间分布上也有差异,某些水源之间存在着一定的转化关系,各类需水对供水水源也起着一定的反馈补充作用,水资源供需平衡计算的复杂性就是要综合考虑上述的关系与影响。自 1996 年以来的水资源供需量计算与分析结果见表 1,表中水资源供需差为正,表示水资源可供水量大于需求量,反之,水资源供需差为负,表示水资源可供水量小于需求量。

表 1 研究区水资源逐年供需平衡分析成果

$10^4 \text{ m}^3$

年份	供 水				需 水			供需平均
	地表水	地下水	其它	小计	工业	农业	小计	
1996	4 303	15 824	122	20 249	3 124	17 125	20 249	0
1997	8 403	15 824	18	24 245	3 024	21 225	24 249	- 4
1998	5 960	19 194	18	25 172	3 674	23 440	27 114	- 1 940
1999	5 070	19 374	18	24 462	3 804	20 575	24 379	83

#### 3.2 咸淡水界面的动态变化及电性特征

图 3 显示了 1989 年, 1992 年, 2000 年的咸淡水界面的变化,从中可以看出,咸水入侵速度极不均衡。原因可能受咸水入侵区用水状况、水文地质、地表水体等因素影响。一般在用水集中区、古河道发育区等地方入侵速度最快;而在现代河床及其附近相对较慢。因此原来较为平直的咸淡水分界线,在向南通移的过程中,形成了弯曲的界线。

咸水入侵带来了大量的盐分,随着入侵时间的增加,地层内积累的盐分就越多。一般的规律是入侵时间长的地层含盐量高,地层电阻率低;入侵时间短的前缘地带,含盐量低,电阻率相对要高;非入侵区的含盐量更低,电阻率最高。

本研究根据区内咸水入侵实测实际情况,将咸水入侵划分为 3 个等级区(表 2)。从表 2 可以看出,滨海平原不同入侵区段电阻率变化范围。

表 2 滨海平原不同入侵区段  $\rho_s$  值变化范围

入侵地段	严重入侵区	轻度入侵区	未侵入区
$\text{Cl}^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	> 1 000	250~ 1 000	< 250
$\rho_s / (\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	3~ 15	15~ 27	> 27~ 50

注:“八五”攻关课题(85-806-01)资料。

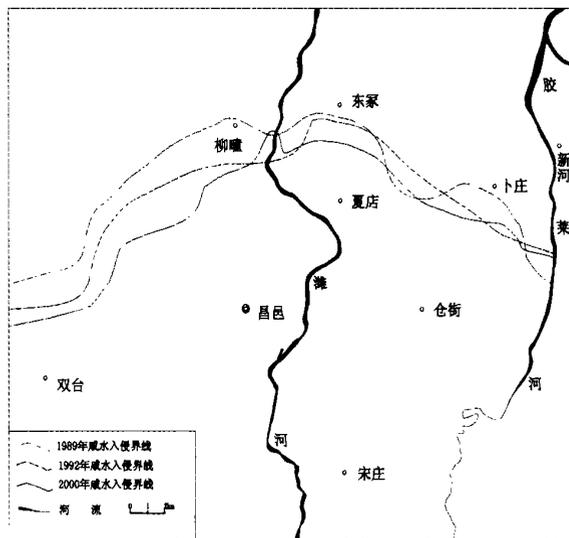


图 3 研究区咸水入侵的界线变化

#### 3.3 地下水位的年内动态变化

由于研究区内降水量年内变化的特点是 60% 以上的降水集中在 7~8 月份,9~10 月份次之,冬春季降水量则较少,因而从图 4 中可以看出,降水是影响地下水位年内动态变化的主要因素。降水因素致使地下水位动态变化曲线呈现出高一最低一最高一低的变化特点,水位变化曲线波动幅度较大。同时,该地

4-6月份的春灌时期,农业用水最为集中,所以在此期间为低谷。自7月份后,降水不断增多,水位逐渐上升,一般在8-9月份形成高峰。

### 3.4 地下水水化学动态变化

3.4.1 地下水水化学特征 研究区地下水水化学特征如表3所示。从表3可以看出,在淡水区,阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,水化学类型为  $\text{HCO}_3^-$ -Ca型水,矿化度小于  $1000 \text{ mg/L}$ ,  $\text{Cl}^-$  浓度小于  $50 \text{ mg/L}$ (见表3中观测6,7号井)。此区的淡水体集中分布于淮河冲洪积扇的上部,此处地形坡度大,径流条件好,地下径流畅通,故地下水交替迅速,水质良好。

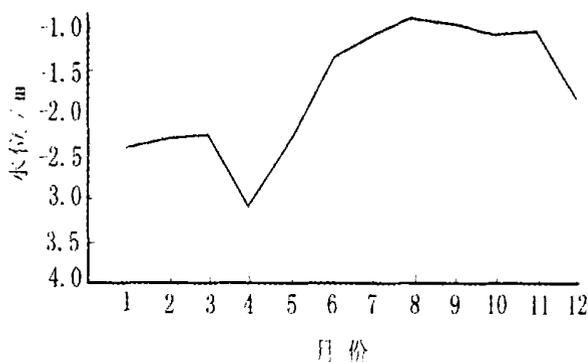


图4 2000年地下水位年内变化曲线(郭瞳监测井)

表3 浅层地下水水化学特征

mg/L

观测井号	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	矿化度
6	2.70	28.00	19.44	52.10	39.00	19.21	237.98	400
7	0.95	96.00	17.01	60.26	60.26	24.02	341.71	600
8	2.40	208.00	52.24	154.31	524.66	96.06	311.20	1400
9	24.00	1070.00	172.53	56.11	1045.78	840.52	1080.05	4300
10	425.00	23250.00	4009.50	631.26	46882.62	5775.61	225.77	81100

注:本研究所布设的跨淡—咸水体之间的一条地下水观测剖面,观测井由南而北编号为6-10号。

在咸淡水过渡区,地下水水化学类型由  $\text{HCO}_3^-$ -Cl型过渡为  $\text{Cl}^-$ - $\text{HCO}_3^-$  阳离子为 Ca-Mg 或 Ca-Na型,矿化度为  $1000\sim 10000 \text{ mg/L}$ ,  $\text{Cl}^-$  浓度一般在  $500\sim 1000 \text{ mg/L}$ (表3)。这是由于由淡水区向北,径流逐渐减弱,地下水体与地质历史时期海侵所形成的埋藏卤水体接近,同时咸卤水与淡水的混合、弥散作用,使  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  含量大大增加。

在北部全咸水区(表3),浅层地下水水化学类型主要为  $\text{Cl}^-$ -Na型,矿化度由南而北浓度逐渐增大,由  $10000\sim 50000 \text{ mg/L}$ ,最高可多于  $100000 \text{ mg/L}$ 。该区位于前述的冲积—海积平原北部与海积平原带,地形平缓,水力坡度小,地下水径流缓慢。地下水基本处于封闭、停滞状态并且不断蒸发、浓缩,矿化度较高,其水化学特征主要受地下咸卤水的控制。

3.4.2 地下水水化学成分动态变化 监测资料显示,在咸淡水过渡区因咸卤水与淡水的混合扩散和弥散作用,使  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  含量大大增加,且  $\text{Cl}^-$  含量由淡水区到咸淡水过渡带逐渐增加,接近咸卤水区时快速增长然后趋向于平缓变化。从  $\text{Cl}^-$  毫克当量百分数变化中可见,  $\text{Cl}^-$  是表现水化学动态变化最有代表性的,可作为判定咸水入侵界面的重要因子。  $\text{HCO}_3^-$  含量由淡水区到咸淡水过渡带变化平缓,由咸淡水过渡带接近咸卤水区时快速下降,在咸卤水区趋向于0。从淡水区到过渡带,  $\text{Na}^+$  的浓度不断减少,  $\text{Ca}^{2+}$  的浓度却不断增加,达到峰值后,又呈反向变化。  $\text{Ca}^{2+}$  富集一方面可能是由于含水层岩土中的离子参与变化,另

一方面可能是由于陆相沉积物所吸附的  $\text{Ca}^{2+}$  与咸卤水中的  $\text{Na}^+$  进行了离子交换,  $\text{Ca}^{2+}$  转移到地下水造成的<sup>[5]</sup>。反向变化的原因是含水层多为第四纪海相沉积层,胶体质点大量吸附了钠离子,当重碳酸钙水通过地层时,发生胶体化学作用,地下水中的钙离子与地层中的  $\text{Na}^+$  进行了阳离子交换过程,致使  $\text{Na}^+$  大量转入地下水中<sup>[4]</sup>,并造成  $\text{Na}^+$  的毫克当量数大于  $\text{Cl}^-$  的毫克当量数。咸水入侵作为一种自然环境灾害,对当地社会、经济和生态环境建设造成了极大影响。因此,开展滨海平原咸水入侵动态监测的研究并及时准确地监测咸水入侵的状况,对咸水入侵灾害的综合防治,实现咸水入侵区区域可持续发展有重大现实意义。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李道高,等.莱州湾南岸平原浅埋古河道带研究[J].海洋地质与第四纪地质,2000,20(1):23-29
- [2] 赵德三,尹泽生,张祖陆,等.山东省沿海区域环境与灾害[M].北京:科学出版社,1992
- [3] 赵德三主编.咸水入侵综合防治寿光示范区建设研究[M].山东科学技术出版社,1996.
- [4] 张祖陆,等.莱州湾东、南沿岸海(咸)水入侵的地下水化学特征[J].中国环境科学,1998,18(2):121-125.
- [5] 张永祥,薛禹群,陈鸿汉.莱州湾南岸晚更新世后地层中沉积海水的特征及其形成环境[J].海洋学报,1996,18(6):61-68.