

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.003

止水不良孔导致地下水串层污染的机制研究

——以衡水某试验孔为例

李敏敏,成建梅,李 莎,郭达鹏

(中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074)

摘要:华北平原长期存在“上咸下淡”的水质格局,近年来,咸水下移问题不断威胁深层淡水资源。根据衡水市某止水不良孔(GK 井)修复前后其周边观测孔(XK4 井)内水质变化情况,通过构建考虑钻孔串层污染的溶质运移模型,对止水不良孔作为优势通道引导咸水下移的机制进行了研究。结果表明:原本水力联系微弱的相邻含水层通过止水不良孔发生了越流,上层咸水在水头差作用下沿井管下移,经滤水管进入淡水层,导致下层淡水迅速咸化;GK 井在 14 个月内形成的污染晕半径为 20~75 m,导致 XK4 井地下淡水矿化度在 5 个月内升高约 5 倍;GK 井封填后,污染物在水动力作用下发生扩散、稀释,被污染淡水在 4 个月后又恢复至原有浓度。止水不良孔造成的串层污染不容小觑,应及时发现及早治理。

关键词:止水不良孔;串层污染;淡水咸化;数值模拟;衡水市

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)03-0014-05

Mechanism of cross strata pollution of groundwater caused by borehole with non-sealing walls: a case study of a test hole in Hengshui City

LI Minmin, CHENG Jianmei, LI Sha, GUO Dapeng

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The phenomenon of salt water distributing in the upper aquifer and fresh water distributing in the lower aquifer exists for a long time in North China Plain. Nowadays, fresh water in the lower aquifer is threatening by the downward migration of salt water. Based on the water quality change around the borehole XK4 before and after the borehole GK with non-sealing walls being repaired, the mechanism of salinization caused by the borehole with non-sealing walls was investigated by building the solute transport model considering cross strata pollution. The results show that the transfluence occurs between the adjacent aquifers, which have faint hydraulic connection, through the borehole with non-sealing walls. Salt water in the upper aquifer migrates downward along the well tube and enters into the fresh water aquifer causing the salinization. The radius of the pollution halo of the borehole GK reaches 20~75 m in 14 months, and the mineralization degree of water in the borehole XK4 increases by five times in five months. After the borehole GK was filled, the pollutant diffused and diluted, and the fresh water recovered to the original concentration in four months. The cross strata pollution caused by the borehole with non-sealing walls should attract enough attention and corresponding measurements should be taken.

Key words: borehole with non-sealing walls; cross strata pollution; salinization of fresh water; numerical simulation; Hengshui City

华北平原是我国缺水比较严重的地区,水资源问题严重制约其经济发展,且平原区咸水、微咸水分布广泛,中东部地区浅层地下水几乎全部为咸水和微咸水^[1]。因咸水开发利用难度大,导致深层地下淡水超采严重,诱发了地下水降落漏斗、地面沉降、地下水污染等一系列环境问题^[2]。20 世纪 70 年代以

作者简介:李敏敏(1988—),女,硕士研究生,研究方向为地下水数值模拟。E-mail:1206702887@qq.com
通信作者:成建梅,教授。E-mail:jmcheng@cug.edu.cn

来,随着地下水开采量的大幅增加,华北平原开始出现深层淡水咸化的现象,严重威胁宝贵的淡水资源。

淡水咸化的原因,一方面是因为深层淡水的大量开采破坏了浅层咸水和深层淡水之间原本存在的势能平衡和水化学场稳定^[3],不断开采的淡水层与几乎处于原始状态的咸水层水头差的增大造成咸水入侵、深层地下水淡水咸化^[4]。地下水过量开采使深层地下水更容易接受上层及外围咸水的补给^[5]。另一方面,随着地下水需求量的增加,机井数量快速增多,止水不严的废弃机井也大量增加。明木和^[6]通过衡水电测井曲线分析验证了咸水通过坏井下渗的结论。孙国春等^[7-8]以天津井水咸化为例讨论了井管部分锈蚀水井、未经处理停用水井和季节使用的咸淡混合开采井造成其井水或周边井水咸化的现象。前人利用水化学方法、水动力场分析、数理统计等手段开展研究,认为除了超量开采引起的巨大水头差之外,废弃井贯通含水层、由点及面地污染淡水也是淡水咸化的重要原因^[1-2, 9-10]。

对于存在止水不良等问题的废弃机井导致深层淡水污染的机制,前人多根据地下水水质进行分析推理,结论的直观性和说服力不足。笔者根据衡水地区某试验孔(XK4井)中地下淡水咸化实例,分析其周边止水不良孔(GK井)对淡水水质的影响,并利用GK井附近4眼深度不同的监测井(XK1、XK2、XK3、XK4井)组成的分层监测系统的监测结果,对研究区进行数值模拟研究,以便直观地展现上层咸水通过止水不良孔越流补给、污染下层淡水的过程,探讨止水不良孔导致淡水咸化的机制。

1 含水层组划分和钻孔分布

研究区位于衡水市北部,华北平原地下水径流带上。区内第四系由上而下可划分为4个含水组^[11],其中第I含水组(I含)底板埋深45m左右,主要为咸水分布;第II含水组(II含)底板埋深120~170m,属微承压、承压水,主要为淡水分布,是该区主要的地下水开采层;第Ⅲ、Ⅳ含水组底板埋深分别在250~350m和350~450m。不同含水组间分布有厚度不等黏土层,其中第I、II含水组之间以20m厚的黏土、亚黏土、亚砂土相隔,属于弱透水层;其他含水组间以黏土相隔,隔水性较好。

分层监测系统位于研究区咸淡水过渡带,由4口钻井组成,分别位于I含底部(XK1井)、I含II含之间的弱透水层(XK2、XK3井)以及II含顶部(XK4井),止水不良孔GK井位于II含底部。XK1井深45m,取水段位于咸水层;XK2井深52m,XK3井深60m,二者取水段均位于咸淡水过带;XK4井

深70m,取水段位于淡水层;GK井深120m,其剖面及平面位置见图1。

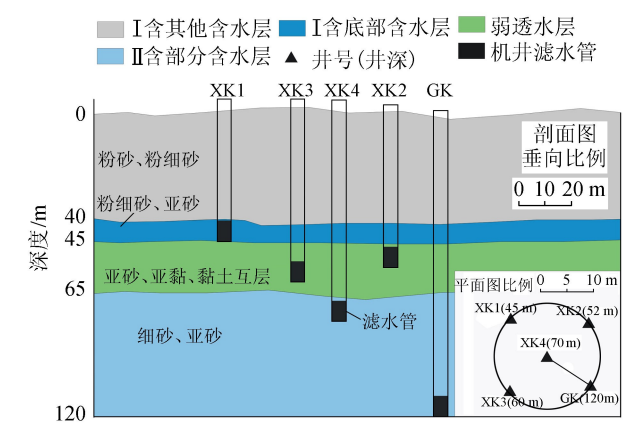


图1 研究区剖面与平面位置

串层污染发生前,XK1、XK2井内地下水为矿化度大于5g/L的咸水,XK3井内地下水为矿化度在1~3g/L之间的微咸水,XK4井内地下水为矿化度小于1g/L的淡水。笔者重点关注XK4井地下水水质变化。

2 串层污染事件描述

2011年12月,研究区新打一眼深120m的钻井(GK井),GK井因成井工艺问题造成止水不良,该井于2013年2月被封填。2012年2月,距离GK井8m远的XK4井地下水矿化度开始升高,且出现较大的波动现象。XK4井地下水水位埋深、矿化度及当地降雨量随时间变化情况见图2。图2中降水量由衡水市气象站提供,矿化度和水位埋深由Solinst Levellogger Model LTC F100/M30水位水温水质记录仪监测。

由图2(a)地下水水位埋深变化曲线可以看出:XK4井地下水水位变化具有明显的季节规律,水位与灌溉关系密切,受降雨影响较小。因春灌抽水的影响,4—7月是低水位期,根据抽水灌溉的时间,地下水水位埋深呈周期性波动。灌溉后地下水受到回渗、降水及河道渗漏补给等作用,水位持续上升,至翌年2—3月达到最高值。

由图2(b)地下水矿化度变化曲线可以看出,XK4井内地下水于2012年2月发生水质恶化,至2012年6月矿化度更是升高至最初矿化度的5倍左右,水质的恶化速率与恶化程度都非常惊人;随后,地下水矿化度在降雨、季节性抽水灌溉等因素的影响下有较大规律性波动;2013年4月地下水水质开始发生好转,矿化度迅速降低,至2013年6月即恢复至原有水平。

XK4井内地下水水质恶化、恢复时间与GK成井、封填时间能够较好地契合,且水质变化存在一定

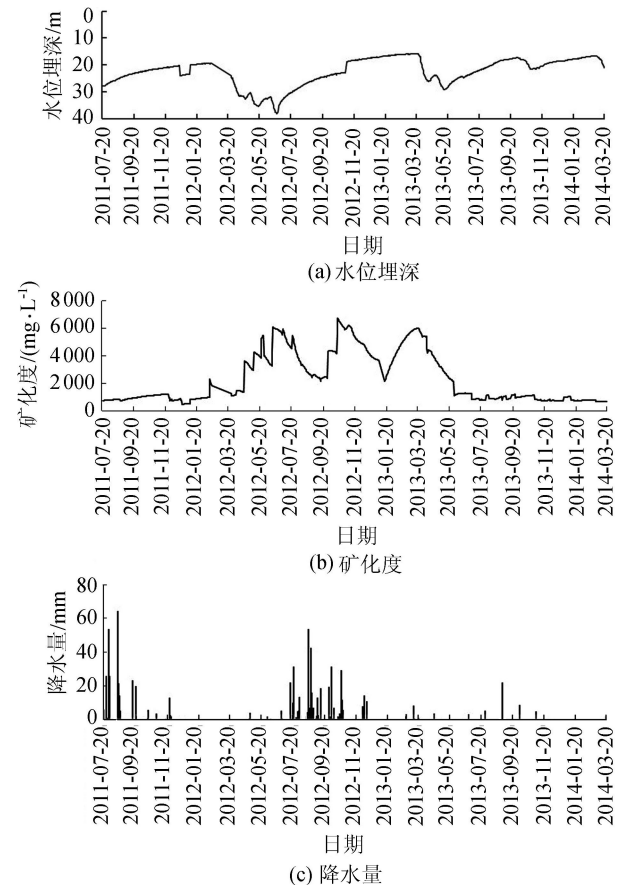


图2 XK4井地下水水位埋深、矿化度及衡水地区降水量随时间变化情况

的滞后效应。其时间对比见表1。

表1 XK4井地下水水质变化时间与GK井成孔、封填时间对比			
GX井成孔时间	XK4井水质开始恶化时间	GX井封填时间	XK4井水质开始恢复时间
2011年12月	2012年2月	2013年2月	2013年4月

为了研究下层淡水水质变化与上层咸水的关系,调查对比了各监测井不同时期的水质情况,见表2。水化学类型由ICAP6300电感耦合等离子光谱仪测试得各阴阳离子浓度,通过数据处理分析所得;矿化度由便携式电导率仪-EC3840现场测得。

由表2可以看出,I含底部含水层(XK1井)的矿化度高于其他含水层,且XK4井地下水变化后的

表 2 各井地下水不同时期的矿化度与水化学类型												
层位	井号	过滤管 位置/ m	2011 年 7 月		2012 年 2 月		2012 年 6 月		2013 年 9 月		2014 年 3 月	
			水化学 类型	矿化度/ (mg · L ⁻¹)	水化学 类型	矿化度/ (mg · L ⁻¹)	水化学 类型	矿化度/ (mg · L ⁻¹)	水化学 类型	矿化度/ (mg · L ⁻¹)	水化学 类型	矿化度/ (mg · L ⁻¹)
I 含底部 含水层	XK1	40 ~ 45	LS-NM	7 602	S-MN	9 055	LS-NM	9 487	LS-NM	4 468	LS-NM	11 550
I 含 II 含 之间弱透 水层	XK2	47 ~ 52	LS-MN	7 470	S-MN	8 354	LS-NM	9 225	S-NM			
	XK3	56 ~ 60	LN-CM	1 161	L-NMC	1 239	L-NCM	1 785	L-NM	1 057		
II 含顶部 含水层	XK4	65 ~ 70	L-NC	778	L-NC	970	S-NM	6 016	L-N	1 132	L-N	720

注:L代表Cl⁻,S代表SO₄²⁻,H代表HCO₃⁻,N代表Na⁺,M代表Mg²⁺,C代表Ca²⁺。

水化学类型与上层咸水相似,故推测在有水头差和浓度差的动力条件下,I含底部含水层地下水通过GK井“天窗”越流补给、污染了II含顶部含水层(XK4井),导致其地下水矿化度增大。

通过以上分析,笔者认为止水不良孔(GK井)可能作为越流通道导致了串层污染的发生,使浅层咸水下移、深层淡水咸化。为了更准确地研究GK井作为越流通道对地下水影响的动态规律,直观地展现地下水的动态变化、流场分布及污染物运移情况,笔者利用数值模拟软件对研究区地下水流及水质进行模拟。

3 止水不良孔的三维地下水溶质运移模拟

3.1 水文地质概念模型

考虑深层淡水受污染范围较小、封孔后水质恢复迅速、水文地质响应局部特征明显,笔者截取1500m×1500m空间尺度作为模型范围。根据区域含水层结构和钻孔资料将模型概化为4层,并进行三角网格剖分,剖分过程考虑了止水不良井周边加密,最终得到3583个单元,1847个节点(图3)。

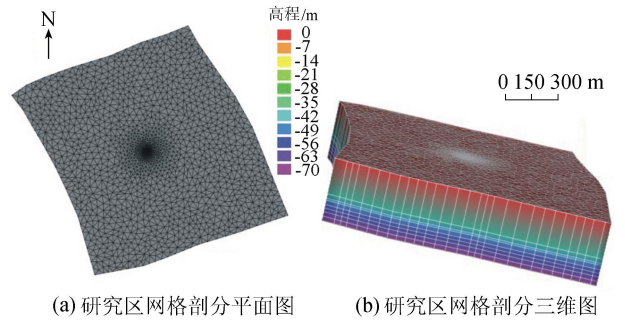


图3 模型网格剖分图

模型的边界刻画参考了研究区地下水流场分布。天然条件下区内地下水自西南向东北流动,模型南北边界刻画为零通量边界,东西边界为流量边界。考虑研究区较小,模型上边界没有分区,统一接受大气降雨补给;下边界为零通量边界;止水不良孔(GK井)设置为多层井边界,穿透弱透水层,流量设为零。各地层水文地质参数参考李亚美等^[12]现场

试验所得(表3)。各含水层初始水头、矿化度资料通过监测获取。

表3 模型各层参数

含水层	底界埋深/ m	$K_x/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$K_z/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$T/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	μ_e	孔隙度
第一层	40	5.789	8.64×10^{-4}	231.560	8.40×10^{-3}	0.20
第二层	45	4.320	0.078	21.600	9.00×10^{-3}	0.18
第三层	65	6.91×10^{-3}	2.59×10^{-5}	0.138	5.00×10^{-6}	0.07
第四层	70	0.929	0.043	4.645	5.00×10^{-4}	0.21

注: K_x 为水平渗透系数; K_z 为垂直渗透系数; T 为导水系数; μ_e 为弹性给水度。

3.2 数学模型

根据研究区水文地质条件,其地下水流数学模型可以概化为均质各向异性非稳定地下水流数学模型,用以下数学模型来描述:

$$\begin{cases} \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \varepsilon \\ H(x,y,z,0) = H_0(x,y,z) & (x,y,z) \in \Omega \\ H(x,y,z,t) = H_1 & (x,y,z) \in S_1 \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} = v(x,y,z,t) & (x,y,z) \in S_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x,y,z 为空间位置坐标; t 为时间坐标; μ_s 为贮水率; H,H_0,H_1 分别为水头、初始水头和第一类边界水头; K_{xx},K_{yy},K_{zz},K_n 分别为 x,y,z 方向和边界法线方向的渗透系数; v 为地下水流速; ε 为源汇项; Ω 为研究区范围; S_1,S_2 分别为第一类、第二类边界。

地下水溶质运移采用对流弥散数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (u_i \rho)}{\partial x_i} \\ \rho(x,y,z,0) = \rho_0(x,y,z) & (x,y,z) \in \Omega \\ \rho(x,y,z,t) = \rho_1(x,y,z,t) & (x,y,z) \in \Gamma_1 \\ D_{ij} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} n_i = q_2(x,y,z,t) & (x,y,z) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为污染物质量浓度; D_{ij} 为水动力弥散系数; u_i 为渗透速度; ρ_0 为研究区污染物初始质量浓度; ρ_1 为研究区第一类边界污染物质量浓度; n_i 代表各方向上的外法线方向余弦; q_2 为弥散通量; ρ_1,q_2 为已知函数; Γ_1,Γ_2 分别为第一类、第二类边界。

为便于与监测结果对比和模型简化,该模型没有区分各离子质量浓度的变化,而以矿化度表征地下水水质的变化情况。

模型模拟时间为2011年7月—2014年3月。结合GK井成孔与封填时间,将模拟时间分为3个阶段,分别为GK井成孔前、成孔后、封填后。因GK井是地下淡水污染的可疑通道,故成孔后阶段是笔者较为关注的阶段。

3.3 数学模型求解

研究区XK4井地下水矿化度模拟结果见图4。

由图4可以看出,模拟结果能较好地拟合监测数据,2012年2月份之前XK4井中矿化度始终低于1g/L,之后迅速升高,同年6月达到最大,后期矿化度受集中抽水灌溉影响不断波动,主要体现在两个方面:①人工抽水加强了水平径流,对污染物起到了稀释作用;②上下含水层加大的水头差导致更多的咸水下移,二者共同影响了水质的变化。2013年3月后XK4井矿化度迅速下降,同年6月恢复到最初水平。

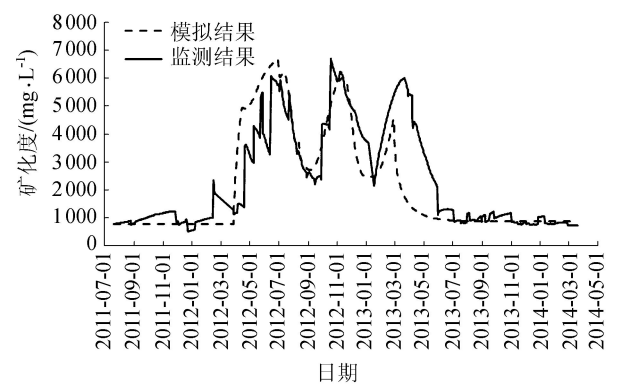


图4 XK4井地下水矿化度模拟结果与监测结果对比

考虑GK孔成井和封堵时间与XK4井水质变化情况,水动力弥散的滞后效应得到体现。2011年12月GK井揭穿弱透层,2013年2月XK4井中水质开始恶化;GK井于2013年2月封填,XK4井水质在2013年4月方开始好转。实际上,GK井和XK4井平面位置连线与地下水流向近于垂直,在非灌溉期,地下水径流缓慢,机械弥散作用微弱,分子扩散作用成为污染物运移的主要动力。因此尽管井间距只有8m,却滞后了整整2个月。抽水灌溉期地下水流速增加,机械弥散作用增强,由GK井壁进入的咸水在水动力条件下迅速迁移扩散,污染晕沿水流方向成羽状分布,咸水在垂直于水流方向波及范围减小,XK4井地下水水质改善。停止开采后水平径流减弱,伴随上层咸水下移,XK4井水质又迅速恶化。

图5形象地演示了上层咸水通过止水不良钻孔GK井运移至下层淡水的过程,20m厚的弱透层很好地阻滞了咸水的区域下移,止水不良孔成为短时间内唯一的越流通道。

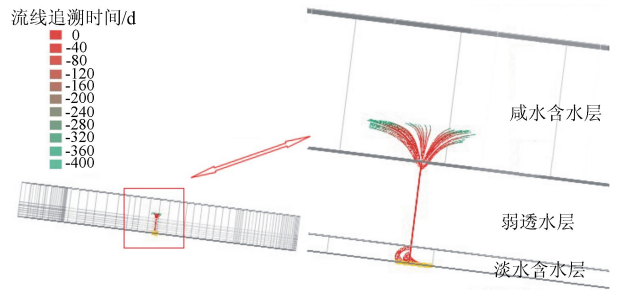


图5 模型地下水后向流线

图6显示了上层咸水通过止水不良孔GK井进

入下层淡水后的运移情况。由图 6 可以看出,地下水矿化度在 GK 井附近(亦为 XK4 井附近)最大,随着与 GK 井距离的增大,地下水矿化度逐渐降低。在地下水流动作用下,污染晕呈羽状分布。

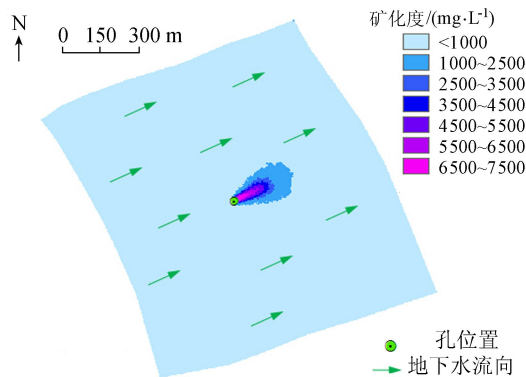


图 6 XK4 井所在含水层地下水矿化度分布

结合试验场地下水监测系统的监测结果和数值模拟结果可以推测:止水不良孔 GK 井是 XK4 井淡水咸化的主要原因,灌溉期大面积抽水形成的水头差、水动力条件会促进上部咸水对淡水的越流补给及其在淡水含水层中的运移扩散,使淡水咸化范围增大;在 GK 井成孔 2 个月后 XK4 井中水质开始恶化;5 个月后 XK4 井内地下水矿化度升高约 5 倍,接近其上层咸水矿化度值;GK 井成孔 14 个月后,模型底部含水层沿水流方向上的污染半径约为 75 m,垂直于水流方向的污染半径约为 20 m,污染半径与含水层渗透性和水动力大小正相关;GK 井封填后 4 个月左右,XK4 井内地下水即恢复至原有浓度。

4 结 论

根据衡水地区某试验孔(XK4 井)中地下淡水咸化实例分析了其周边止水不良孔(GK 井)对淡水水质的影响,并利用 GK 井附近 4 眼深度不同的监测井(XK1、XK2、XK3、XK4 井)组成的分层监测系统的监测结果,对研究区进行了数值模拟研究,得出如下结论:

a. 止水不良孔会成为越流通道,使原本没有水力联系或水力联系微弱的含水层通过井管发生越流。上层地下水会在水头差作用下沿井管下移,经滤水管进入淡水层,并在浓度差与对流作用下扩散。在止水不良孔的“天窗”作用下,深层淡水矿化度在 5 个月内即升高约 5 倍,水质与其上层咸水相似,水化学类型由 L-NC 变为 S-NM。

b. 利用数值模拟方法对止水不良孔的“天窗”作用进行模拟,模拟结果能较好地拟合监测结果。通过模拟结果推测,一眼止水不良孔 14 个月的影响半径约为 20 ~ 75 m,影响范围随含水层渗透系数和水动力条件的增大而增大。

c. 作为点源污染,止水不良孔封填后,被污染地下水在机械弥散与分子扩散作用下,4 个月左右可恢复至原有浓度。

止水不良孔的长期存在和大量分布势必会加速衡水市,乃至华北平原淡水咸化进程,使水资源本就匮乏的华北平原陷入更大窘境。上层咸水通过井管直接注入淡水层,淡水的咸化未改变位于弱透水层的咸淡水界面埋深。“井水咸化”虽然不等同于含水层淡水咸化,但对其进行研究可揭示小范围渗流场内地下水异常现象,促进对地下水污染的研究。笔者认为,对衡水市乃至华北平原废弃机井进行普查、统计、修复或封填,意义重大且刻不容缓。

参考文献:

- [1] 费宇红,张兆吉,宋海波,等. 华北平原地下咸水垂向变化及机理探讨[J]. 水资源保护, 2009, 25(6): 21-23. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, SONG Haibo, et al. Discussion of vertical variations of saline groundwater and mechanism in North China Plain [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(6): 21-23. (in Chinese))
- [2] 吴爱民,李长青,徐彦泽,等. 华北平原地下水可持续利用的主要问题及对策建议[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 110-113. (WU Aimin, LI Changqing, XU Yanze, et al. Key issues influencing sustainable groundwater utilization and its countermeasures in North China Plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 110-113. (in Chinese))
- [3] 张素娥,李志军,孙先锋,等. 河北省地下咸水对地下淡水资源入侵影响分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 20(1): 26-30. (ZHANG Sue, LI Zhijun, SUN Xianfeng, et al. Impact of invasion of salty groundwater into fresh groundwater in Hebei Province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 20(1): 26-30. (in Chinese))
- [4] 陈彭,王威,马震. 河北渤海新区地质环境问题探究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2014(11): 200-202. (CHEN Peng, WANG Wei, MA Zhen. Exploration of geological environmental problem in Hebei Bohai New Area [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2014(11): 200-202. (in Chinese))
- [5] WEI Aihua, MA Fengshan, YAN Dongfei, et al. The salinization problem of the deep groundwater based on multivariable statistical methods [C]//. Advanced Materials Research. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications, 2013: 2520-2524.
- [6] 明木和. 衡水深层淡水咸化问题的探讨[J]. 水文地质工程地质, 1986(5): 42-44. (MING Muhe. The discussion of deep fresh water salinization in Hengshui [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1986(5): 42-44. (in Chinese))

(下转第 43 页)

on projection pursuit and genetic algorithm [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2005 (4): 22-28. (in Chinese))

[8] 崔文华, 刘晓冰, 王伟, 等. 混合蛙跳算法研究综述[J]. 控制与决策, 2012, 27 (4): 481-486. (CUI Wenhua, LIU Xiaobing, WANG Wei, et al. Survey on shuffled frog leaping algorithm [J]. Control and Decision, 2012, 27 (4): 481-486. (in Chinese))

[9] 雷开友. 粒子群算法及其应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.

[10] 张长胜, 孙吉贵, 欧阳丹彤. 一种自适应离散粒子群算法及其应用研究[J]. 电子学报, 2009, 37 (2): 299-304. (ZHANG Changsheng, SUN Jigui, OUYANG Dantong. A selfadaptive discrete particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37 (2): 299-304. (in Chinese))

[11] 纪昌明, 李继伟, 张新明, 等. 基于免疫蛙跳算法的梯级水库群优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33 (8): 2125-2132. (JI Changming, SUN Jiwui, ZHANG Xinming. Optimal operation of cascade reservoirs based on immune-shuffled frog leaping algorithm [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2013, 33 (8): 2125-2132. (in Chinese))

[12] 王辉, 钱锋. 群体智能优化算法[J]. 化工自动化及仪表, 2007, 34 (5): 7-13. (WANG Hui, QIAN Feng. A

survey of swarm intelligence optimization algorithm [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2007, 34 (5): 7-13. (in Chinese))

[13] 郭景录, 付平. 登月软着陆轨道优化算法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26 (12): 70-73. (GUO Jinglu, FU Ping. Research on trajectory optimization of lunar soft landing [J]. Computer Simulation, 2009, 26 (12): 70-73. (in Chinese))

[14] 仲艳维. 潮白河流域水土保持效益评价及生态补偿制度构建研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

[15] 刘邦贵, 刘永强, 王浩, 等. 基于物元分析法的区域水资源安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014 (5): 100-103. (LIU Banggui, LIU Yongqiang, WANG Hao, et al. Evaluation of regional water security based on matter element analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014 (5): 100-103. (in Chinese))

[16] 王婷, 郑小华. 物元分析方法在水资源承载能力综合评价中的应用[J]. 水文, 2006, 26 (6): 33-35. (WANG Ting, ZHENG Xiaohua. Application of material-units analyzing method in comprehensive evaluation of water resources carrying capacity [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26 (6): 33-35. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 09 - 16 编辑: 王 芳)

(上接第 18 页)

[7] 孙国春, 卞学洛. 非含水层水质咸化的“井水咸化”现象分析[J]. 地下水, 2011, 33 (3): 17-20. (SUN Guochun, BIAN Xueluo. The phenomenon analysis of well water salinization which is not aquifer water salinization [J]. Groundwater, 2011, 33 (3): 17-20. (in Chinese))

[8] 卞学洛. 天津市深层淡水井的水质咸化分类: 以东丽区为例[J]. 地下水, 2008, 30 (1): 15-20. (BIAN Xueluo. Classification of water saltilization in the deep fresh-water well in Tianjin: take Dongli district for example [J]. Groundwater, 2008, 30 (1): 15-20. (in Chinese))

[9] 宋海波, 张兆吉, 费宇红, 等. 开采条件下河北平原中部咸淡水界面下移[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34 (1): 44-52. (SONG Haibo, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, et al. Down-movement of the fresh-saline groundwater interface in the middle of the Hebei Plain under the condition of exploitation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34 (1): 44-52. (in Chinese))

[10] 左文喆, 万力. 天津市平原区咸淡水界面下移特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33 (2): 13-18. (ZUO Wenzhe, WAN Li. Characteristics of down-

movement of the fresh-saline groundwater interface in the plain region of Tianjin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33 (2): 13-18. (in Chinese))

[11] 高业新. 华北平原典型地区大规模开采条件下不同层位含水组地下水互动关系研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.

[12] 李亚美, 成建梅, 崔莉红, 等. 分层监测孔现场分级联合试验确定含水层参数[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11 (3): 132-137. (LI Yamei, CHENG Jianmei, CUI Lihong, et al. Determination of aquifer parameters from comprehensive in-situ pumping and tracing test in the multi-layer monitoring boreholes [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11 (3): 132-137. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 03 - 19 编辑: 王 芳)

