



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.010

李莎, 成建梅, 李敏敏, 等. 人类开采活动影响下的衡水地区[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 55-61, 100. LI Sha, CHENG Jian mei, LI Min min, et al. Water quality characteristics and evolution of groundwater system influenced by human exploitation activity in Hengshui area[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 55-61, 100. (in Chinese)

人类开采活动影响下的 衡水地区地下水水质特征及演化

李莎, 成建梅, 李敏敏, 崔莉红

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘要: 衡水地区地下水普遍存在“上咸下淡”的水质格局, 受深部淡水持续超采影响, 浅层咸水有逐年下移而使淡水咸化的趋势。选择衡水地区典型剖面, 通过水质长期监测, 结合地下水开采情况, 分析 2011 至 2014 年该剖面上地下水水位与水质监测资料, 总结了衡水地区地下水水化学特征及其演化规律。研究表明, 浅层含水层中水平径流微弱, 地下水水质由西向东逐渐好转, 其中西部地下水离子浓度变化较大; 深部含水层中水平径流明显, 地下水水质整体良好, 但有逐年恶化的趋势; 人类开采活动一定程度上增强了浅层和深层含水层间的水力联系, 使二者中离子浓度随时间的波动呈现出一定的相关性。

关键词: 水质变化; TDS; 离子浓度; 离子比值; 水力联系; 咸淡水界面; 越流补给

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0055-07

Water quality characteristics and evolution of groundwater system influenced by human exploitation activity in Hengshui area

LI Sha, CHENG Jian mei, LI Min min, CUI Li hong

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

Abstract: The water pattern that brine mainly distributed on upper aquifer and freshwater retained in the deeper sediments commonly existed in the Hengshui district. Being excessive exploitation, the deeper freshwater trended to be salty induced by the shallow brine downward mitigation. A typical profile of domain was selected to investigate groundwater chemical characteristics variation, and its corresponding evolution mechanisms was analyzed via the data of water level, chemical changes and groundwater pumping during 2011-2014. The results showed that, the shallow aquifer showed a weak runoff in the horizontal direction; the shallow groundwater had a behavior of diverse chemical distribution with water quality improved from west to east among which ion concentration fluctuated significantly in the west. Reverse, horizontal runoff of deeper aquifer was strengthened by human excessive exploitation. There was a tendency to deteriorate in deep water though a better water quality remained nowadays. Hydrodynamic between adjacent aquifers was enhanced by pumping activities. There were some correlations of ion content between them and water seeped from irrigation took major accounts of recharge. Thereby, the deep freshwater was getting worse with interface of downward saline water.

Key words: water quality change; TDS; ion concentration; ionic ratios; hydraulic connection; interface of salt and fresh water; leakage recharge

收稿日期: 2015-12-21 修回日期: 2016-04-07 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1342.030.html>
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB42880203)

Fund: The National Basic Research Program of China(973 Program)(2010CB42880203)

作者简介: 李莎(1988), 女, 安徽蚌埠人, 主要从事地下水水流及溶质运移研究。E-mail: 838752458@qq.com

通讯作者: 成建梅(1971-), 女, 新疆博乐人, 博士, 教授, 主要从事地下水水流和污染模拟方面的研究。E-mail: jmcheng@cug.edu.cn

由于水文地质条件和地质因素等原因,在华北平原东部和中部地区的浅层含水层中分布着大量的咸水,深层含水层为淡水,普遍存在“上咸下淡”的水质格局。20 世纪 70 年代以来,随着工业和农业的迅速发展,深层地下水被大量开采导致深层地下水的水头急剧下降,形成了规模较大的降落漏斗。深层地下水超采对衡水市地下水动力场产生了重大影响,目前深层地下水与浅层地下水水头差达到 40 m 以上^[1],巨大的水头差为浅层咸水的下移提供了可能^[2]。

针对人类开采活动下华北平原的地下水问题,前人做了大量的研究工作^[3-11],高业新^[12]通过大量的抽水实验和相关的模拟工作,发现在大规模开采条件下浅层地下水与深层地下水仍然保留着各自独立的动态特征,浅层地下水通过越流方式补给深层地下水,深层地下水之间具有微弱的越流关系。宋洋^[13]认为自 20 世纪 50 年代以来,人类活动影响下衡水市地下水环境的演化经历了原始共生、地下水采补均衡、地下水采补失衡以及生态环境恶化四个过程。深层地下水的水化学场处于快速演化状态,水质呈恶化趋势。毕二平^[14]通过对地下水中离子含量的分析,认为人类活动对河北平原地下水水质演化的影响具体表现在大量抽取地下水引起区域地下水动力条件改变,以及各种人类活动综合引起的地下水水化学场改变两个方面。如上所述,前人对于人类活动影响下华北平原的水质和水量问题分别做了大量的研究工作,但是针对衡水地区地下水水质及水量在横向和纵向上的综合研究较少,忽略了水质和水量在人类活动影响下在空间和时间上的相关性。地下水系统是一个复杂的不断变化的开放系统,气象、构造和人类活动等诸多因素都会或多或少的影响着地下水系统的循环过程。尤其是在地下水大规模开采的情况下,地下水系统的自然平衡状态被打破,在这个前提背景下从空间及时间等各个角度综合的分析地下水水质及水量之间的关系更具有实际意义。

细致的水位水质监测资料分析是理解和解决人类活动影响下华北平原地下水问题的前提和关键,而不同时空条件下深浅含水层水质分布具有不同特点,本文选择衡水地区典型剖面,通过水质长期监测,结合地下水开采情况,明确衡水地区区域流场的演化特征,分析 2011 至 2014 年该剖面上地下水水位与水质监测资料,综合研究了衡水地区地下水水量及化学组分在横向及纵向上的相互联系、分布特征和演化规律,揭示了地下水水质与人类活动之间的响应关系。

1 水文地质条件与采样点的分布

河北省衡水市位于华北平原中部,研究区地层由上而下划分为四套含水层见图 1^[15-17],其中第 \tilde{N} 含水层属于潜水-微承压含水层,第 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 含水层均为承压含水层。咸淡水界面大致位于第 \tilde{N} 含水层和第 $\tilde{0}$ 含水层之间。为了分析咸水和淡水的水质变化,本文将含水层划分为两类,浅层含水层(第 \tilde{N} 含水层)和深层含水层(第 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 含水层)。浅层含水层的补给源主要有大气降水入渗、河道入渗、渠道渗透和灌溉回归入渗,侧向径流缓慢,天然条件下以蒸发排泄为主。近年来由于深层地下水的大量开采,浅层地下水向深层含水层的越流补给成为其重要的排泄方式。深层含水层天然状态下补给以侧向径流为主,径流方向自西向东,主要的排泄途径是侧向径流排泄。同样受人类活动影响,浅水含水层越流补给和人为开采成为深层地下水的主要补给和排泄方式。

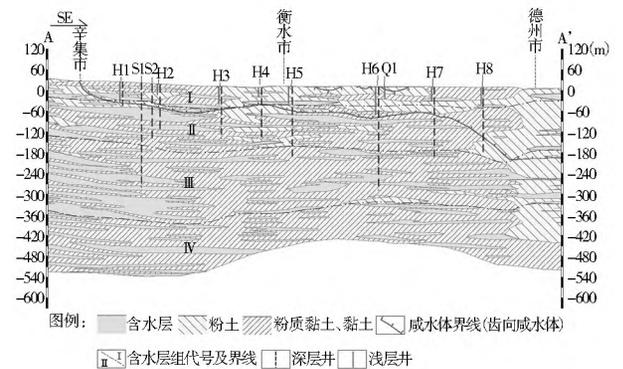


图 1 研究区水文地质剖面图(A-A')

Fig. 1 Hydrological profile(A-A') of the study area

在 2011 年至 2014 年期间,在灌溉期对研究区进行了 7 次取样工作,共包括 25 个取样点(浅井取样点编号以 Q 开头,深井取样点编号以 S 开头,部分取样点同时包括深井与浅井,编号以 H 开头。下文中 HQ 代表 H 取样点处的浅井,HS 代表 H 取样点处的深井。),32 个取样井见图 2,共取浅层水水样 63 组,深层水水样 81 组。选定横穿衡水的东西向剖面为重点研究剖面,剖面东部指向渤海,西部指向太行山脉,方向与自然条件下区域地下水径流方向基本一致,且咸水层厚度逐渐增加,以期研究由山区向沿海过渡的径流排泄区地下水径流过程中水质变化。取样工作在研究区已有的生活用井或灌溉井的基础上进行,取样井的选择原则为:(1)尽量在同一取样点同时存在浅层和深层两口取样井,以方便研究水质在纵向上的关系;(2)保证剖面沿线及其附近取样井尽可能多且尽量保持数据在时间上的连续

性,为水质沿剖面变化的研究提供充足的数据。

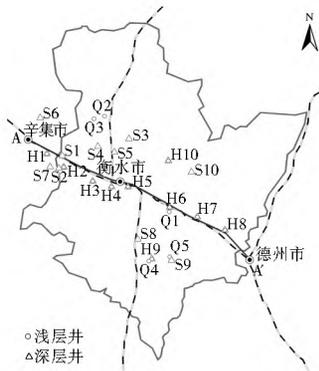


图2 剖面(A-A')及取样点分布

Fig. 2 Location of the profile(A-A')and distribution of sampling sites

在样品采集现场测试水样的水温、溶解氧、pH值、电导率、TDS。所采集的样品分为两部分,用取样瓶分装,一个用来测阴离子,一个用来测阳离子。用来测阳离子的水样用HNO₃酸化至pH小于2.0,然后尽快送至实验室进行测试,室内分析项目包括地下水的七大离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻)以及微量元素或离子(Fe²⁺、Fe³⁺、Al³⁺、NH₄⁺、Cu²⁺、Pb²⁺、Zn²⁺、Mn²⁺、Cr⁶⁺、Cd²⁺、CO₃²⁻、NO₃⁻、F⁻以及I⁻)。

2 水位及区域流场变化

从20世纪70年代到2000年期间衡水地区深层地下水位整体呈持续下降趋势见图3,整体降幅约50 m左右。浅层水位也有一定程度的下降,但其下降幅度明显小于深层水。随着地下水水位的变化,地下水区域流场也在不断的发生变化。

20世纪60年代,衡水地区地下水利用程度较低,地下水水位处于天然状态。在天然流场状态下,浅层地下水自西南向东北流,水平流速十分缓慢,水位埋深一般小于5 m,蒸发作用较强,地下水以垂向循环为主,其动态特征主要受降雨和蒸发控制。深层地下水主要补给来源是山前侧向径流,水体以极小的流速由西南向东北流动。此时咸水分布也处于天然状态,咸淡水界面埋深为50~70 m,由西向东埋深逐渐变深。

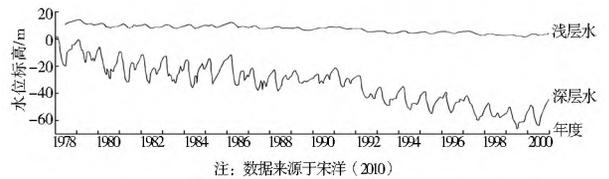


图3 1978年-2000年期间浅层水和深层水水位变化

Fig. 3 Changes of groundwater level in the shallow and deep aquifer from 1978 to 2000

20世纪70-80年代,随着农业和工业需水量的增加,地下水被大量开采。由于在衡水地区浅层含水层为咸水层,很少被利用,人们往往大量抽取深层水用于农作物的灌溉和日常生活,结果导致衡水市区深层地下水开采量迅速增加,天然流场发生改变,深层地下水位明显下降,形成一个以衡水市为中心的大型降落漏斗见图4。在此影响下浅层含水层对深层含水层的越流补给作用有所增强,这就使得浅层咸水存在下移的趋势,进而威胁深层淡水的水质。由于漏斗形成时间相对较短,同时浅层水的开采量相对较小,所以浅层水位的降幅并不明显。在此阶段期间,咸淡水界面整体下移,埋深小于50 m的区域基本消失。

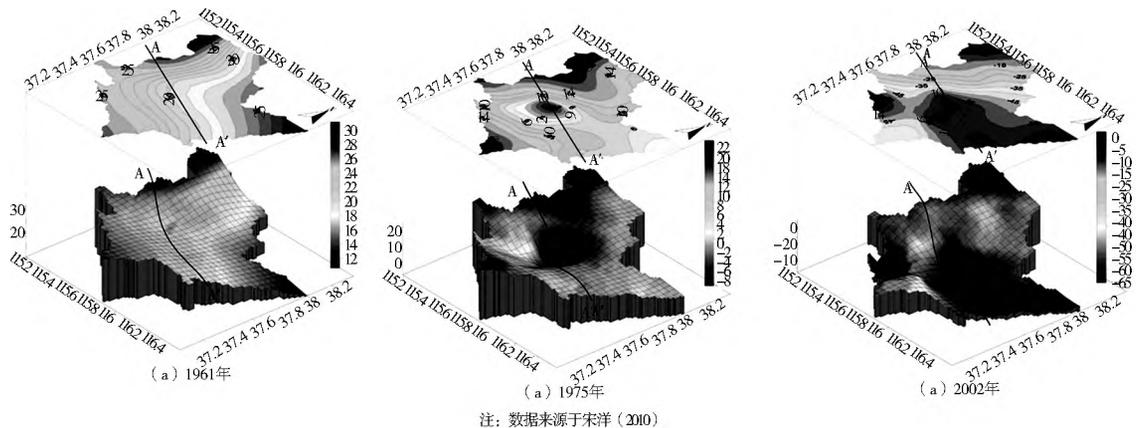


图4 深层水水位演化

Fig. 4 Evolution of groundwater levels in the deep aquifer

20世纪90年代至今,深层水被大范围地大量开采,深层地下水位持续降低,同时打破了以衡水为中心的大型降落漏斗的单一局面,逐渐形成了多个小型降落漏斗。与此同时,由于长期的越流补给使

浅层地下水水位明显下降,蒸发作用大幅减弱,同时出现了多个降落漏斗,在漏斗中心附近形成了多个地下水流动系统。咸淡水界面整体下移,埋深约为60~80 m,但是其分布规律基本未变,仍然是由西

向东埋深逐渐变深。

在一个完整水文年内,由于农业开采导致深层地下水水位随季节明显波动,波动幅度约 20 m 左右。结合王家井(位于研究区西边界)的水位观测资料和降雨量资料见图 5, 深入分析浅层水位波动趋势发现,在 2011 年至 2014 年期间,浅层地下水水位也呈现明显的季节性波动见图 5。由于浅层水很少被开采,所以该点浅层含水层的水位变化与降雨量的关系密切,雨季浅层地下水水位明显抬升,之后由于向深层越流,浅层地下水水位缓慢下降。衡水地区每年灌溉期分别在 3 月和 7 月,密集的农田回灌水导致浅层水位的抬升,考虑包气带滞后效应影响,图 5 中 5 月相对较高的水位反映了灌溉作用的影响,而 7 月灌溉期和雨季重合,导致 8 月水位达到全年最大。

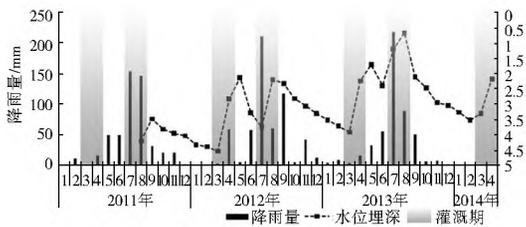


图 5 浅层水位(王家井)与降雨量关系

Fig. 5 Relationship between the rainfall with the groundwater level of shallow aquifer

3 水质变化

3.1 水质随时间变化

由 2.2 中结论可知,浅层水位变化与降雨、灌溉关系密切,浅层水水量的变化必然引起水质随之变化,所以浅层地下水 TDS 的波动应当可以反映出降雨量和灌溉量的变化。

图 6 显示的是 H7 取样点处深井(HS7)和浅井(HQ7)中地下水 TDS 与降雨量之间的关系。由图可知,降雨较多的月份或者灌溉期内,浅层水 TDS 均有降低的趋势,反映了该点处地下水 TDS 对补给水量变化具有一定的响应作用,印证了上述推测的浅层地下水 TDS 与降雨量和灌溉量之间的关系。同时由图 6 可知,深层水 TDS 也具有和浅层水相类似的变化趋势,这是由于深层水接受浅层水的越流补给造成的。受取样点个数及取样连续性的限制,使得目前资料还不能完全说明在区域上地下水 TDS 与补给量变化的响应关系,但该点的现象可以在一定程度上反映出这种地下水 TDS 与对水量变化的响应现象。

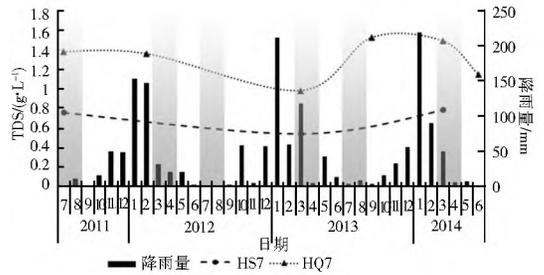


图 6 浅层水和深层水 TDS 随时间变化

Fig. 6 Changes of TDS with time in the shallow and deep aquifers

3.2 水质随剖面变化

通过对照剖面上 2011 年 7 月的浅层水 TDS 曲线和水位埋深曲线发现二者之间存在十分明显的相关性见图 7,水位较高地区的 TDS 相对较低,反之水位较低地区的 TDS 较高。说明灌溉水的回渗直接影响了衡水地区浅层地下水水质。

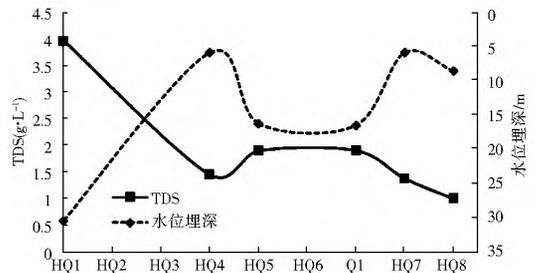


图 7 2011 年剖面浅层水埋深与 TDS 变化

Fig. 7 Changes of the water level and TDS in the shallow aquifer along the profile in 2011

对比剖面上浅层地下水各年的 TDS 曲线可知,剖面西部监测井的 TDS 较大,浅层地下水水质沿剖面向东有好转的趋势。另外,剖面西部 TDS 变化较大,东部变化相对较小,且剖面中部有一些不规律的波动现象见图 8。这是由于剖面上不同地区灌溉量存在较大差异,剖面西部年际灌溉量差异较大,东部每年灌溉量较稳定。

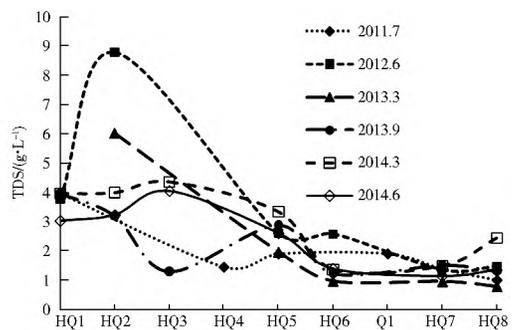


图 8 剖面浅层水 TDS 变化

Fig. 8 Changes of the TDS in the shallow aquifer along the profile

分析各离子浓度不同时间沿剖面的变化曲线见图 9,发现 HCO_3^- 的浓度在剖面上由西到东呈“S”形上升趋势,体现了浅层地下水水质沿剖面逐渐好转的

趋势。其他各离子浓度在剖面上与 TDS 变化一致,

西部的离子浓度波动变化较大, 东部波动较小。

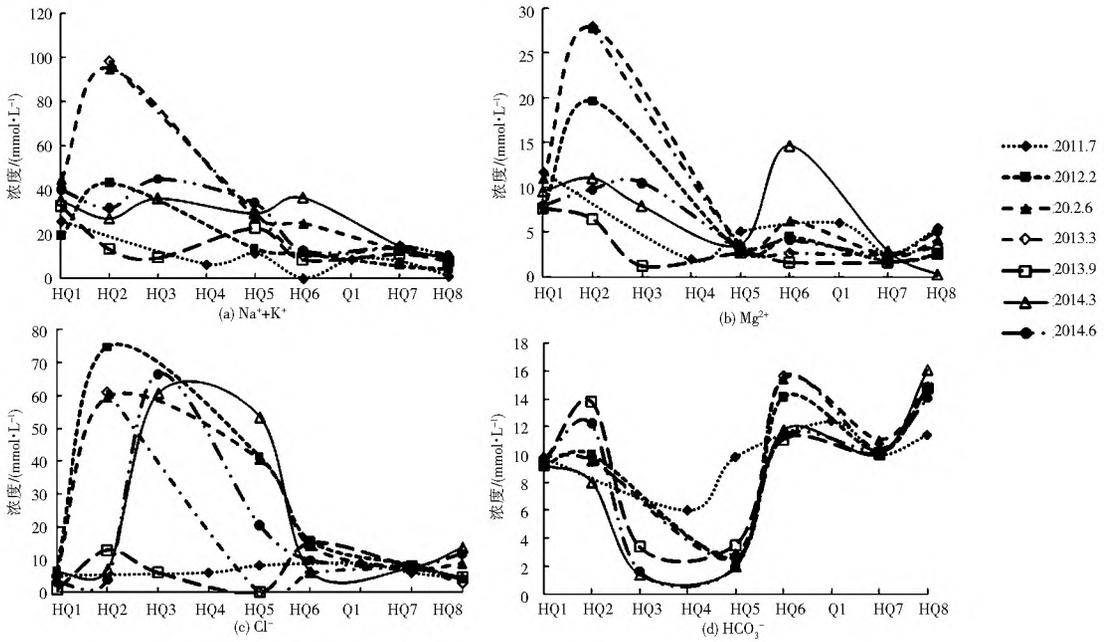


图 9 剖面浅层水离子浓度变化

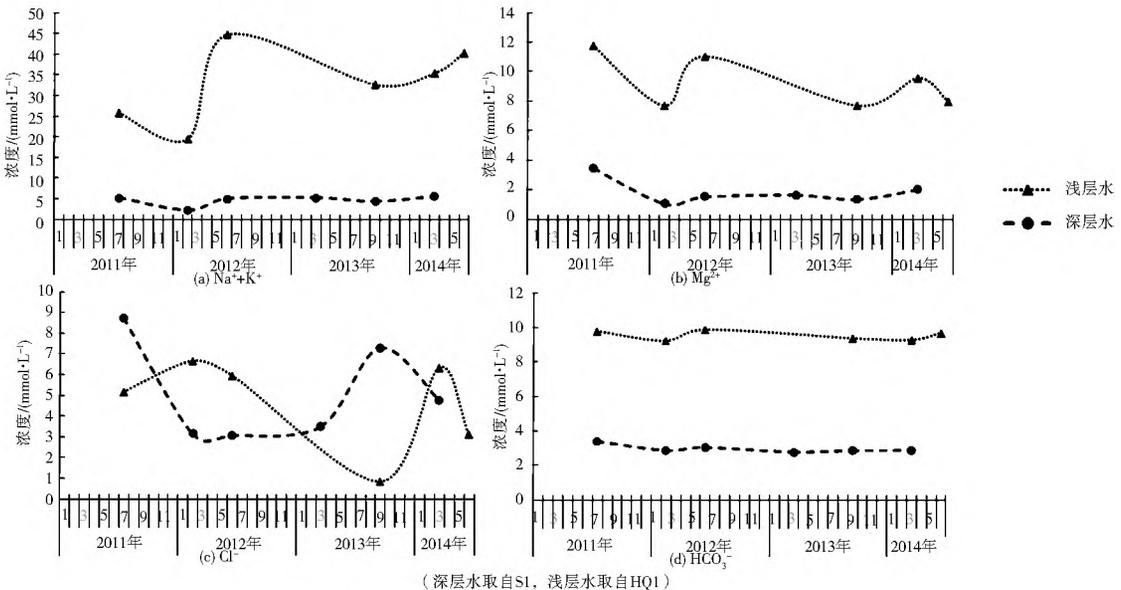
Fig. 9 Changes of ion concentration in the shallow aquifer along the profile

4 深层水和浅层水中离子浓度变化关系

位于研究区西侧的深井 S1 和浅井 HQ1 距离较近, 综合分析这两口井的离子浓度随时间的变化见图 10, 发现: 在监测期间浅层水中除 Cl⁻ 外的其它各离子浓度远远大于深层水, 且深浅水的离子浓度随时间的波动呈现出明显的一致性; 但深层水中各离子浓度波动幅度要明显小于浅层水。这种离子浓度波动的一致性一定程度上说明了浅层含水层和深层含水层之间可能存在一定的水力联系。高业

新^[18] 针对浅层含水层和深层含水层之间的互动关系做了数值模拟, 结果显示深层含水层上部在抽水时有 21.4% 的抽水量来自越流补给, 这一结论与上述研究结果一致。

特别地, 浅层含水层和深层含水层中的 Cl⁻ 浓度呈现明显的负相关关系(图 10(c))。这是由于 Cl⁻ 很少与其他离子反应, 且几乎不被土体吸附, 因而可以认为存在于深层和浅层含水层中的 Cl⁻ 总量几乎不变。随着深浅层水循环交替, 浅层和深层含水层的氯离子呈现出负相关波动的特点。



(深层水取自 S1, 浅层水取自 HQ1)

图 10 浅层水和深层水离子浓度对比

Fig. 10 Comparison of ion concentration in the shallow and deep aquifers

5 离子比值分析

通过对地下水中主要离子的比值分析,可以得到地下水来源及水质演化的相关信息,与传统的离子分析方法相比更能体现地下水在较长的时间尺度上的演化特点,在一定程度上为区域水文地球化学演化过程提供判断依据。

γ_{Na}/γ_{Ca} 和 γ_{Na}/γ_{Mg} 值的变化可以反应在地下水流动的过程中是否发生离子交换反应^[19]。在深层地下水中不论是 γ_{Na}/γ_{Mg} 系数还是 γ_{Na}/γ_{Ca} 系数,随着剖面由西向东都呈逐渐升高趋势见图 9(a) 和图 9(b),说明随着地下水由西向东缓慢渗流的过程中 Na^+ 的比例逐渐增加,是由于在渗流过程中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 置换出土颗粒表面的 Na^+ 造成的。浅层地下水的 γ_{Na}/γ_{Mg} 系数和 γ_{Na}/γ_{Ca} 系数没有体现出明显的规律性,推测是由于农业灌溉活动强烈,灌溉水将包气带土层中的离子溶滤到浅层含水层中,打乱了其自然条件下的规律性。

由于地下水中的生物多为异养型,它们消耗有

机物产出二氧化碳,造成二氧化碳在水动力条件较差的地方聚集,溶于水产生碳酸,进而增加了碳酸钙的溶解,最终导致水中 Ca^{2+} 含量的增加。另外由于地下水中 Cl^- 含量比较稳定,所以 γ_{Ca}/γ_{Cl} 值可以用来刻画水动力情况,其比值越大水动力条件越差^[20]。自然条件下在剖面上地下水由西向东流动,由西向东水动力条件应当逐渐减弱, γ_{Ca}/γ_{Cl} 值应当逐渐升高。但是实际监测结果并非如此见图 9(c) 和图 9(d),甚至存在相反的趋势。进一步对比图 9(c) 和图 9(d) 发现,在某些年份 H_1 、 H_2 和 H_5 处浅层水的 γ_{Ca}/γ_{Cl} 值远远大于深层水的 γ_{Ca}/γ_{Cl} 值。在天然情况下,浅层水循环较快,其水动力条件应当比深层水要好,但是在上述取样点恰恰出现了相反的情况,这是由于该地区深层含水层是主要被开采层,加之研究区天然情况下地下水径流十分缓慢,在大量抽取深层水的情况下,深层水的水动力条件要明显强于浅层水,上述两个现象说明研究区内人类活动对地下水的影响强烈,以至于改变了局部地区自然条件下的水动力条件。

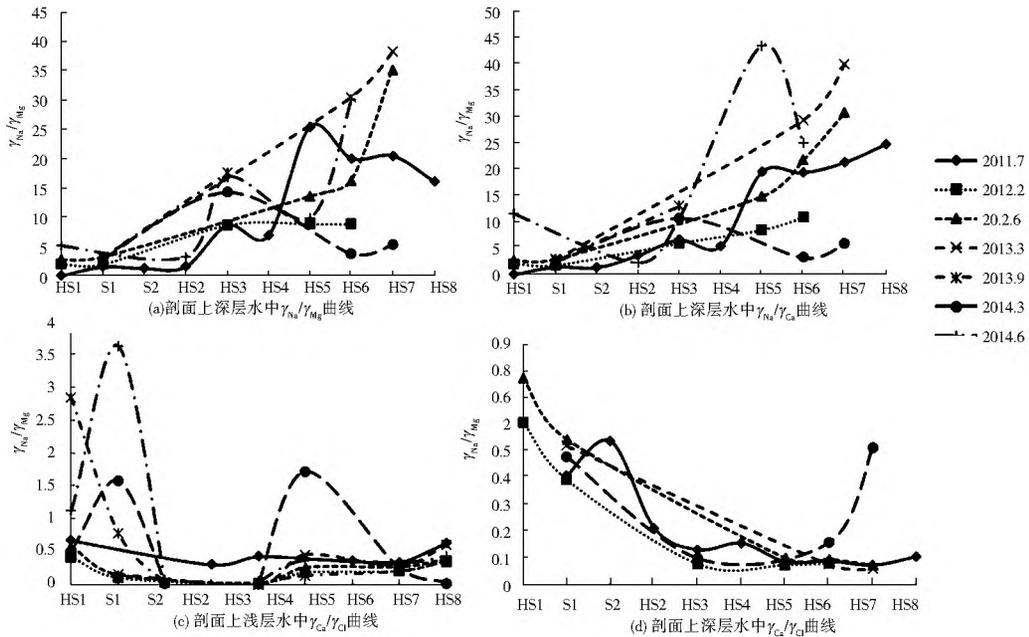


图 11 离子比值分析
Fig. 11 Analysis of ion ratio

6 总结与讨论

在衡水地区“上咸下淡”的水质格局下,在分析 2011 年至 2014 年期间研究区含水层水质监测结果的基础上,通过对地下水水位、水质动态对比分析发现:

(1) 浅层含水层的水位及水质与降雨量和灌溉回渗量之间存在着一定的响应关系。

(2) 浅层地下水水质沿剖面有好转的趋势,且由于受西部地区离子浓度波动较大。

(3) 在抽采活动强烈地区深层含水层产生明显的水平径流,造成其水动力条件好于浅层含水层。

(4) 浅层含水层和深层含水层之间存在一定的水力联系,与前人研究结论一致。另外,浅层水和深层水中的 Cl^- 含量成负相关关系,其他离子呈正相关关系。

(5) 长期的蒸发及溶滤作用是影响研究区内地下水化学成分的主要因素。

基于上述研究结论,预测在长期维持目前地下

水的开采量和开采层位的条件下,深层地下水位将不断降低,浅层地下水向深层含水层越流,深层水逐渐咸化。同时,浅层地下水位不断下降,造成蒸发量大幅减小,蒸发浓缩作用减弱。加之较淡的雨水和灌溉回归水不断补给浅层含水层,对浅层水有稀释作用。所以,未来衡水地区的咸淡水界面将不断下移,深层含水层逐渐咸化,浅层含水层呈淡化趋势。

另外,本研究还存在如下不足之处,在今后的工作中加以补充。

(1) 由于本次研究中取样数据完整性的限制,只针对一个点研究了浅层含水层的水位及水质与降雨量和灌溉回渗量之间的响应关系,在以后的研究工作中应加以补充研究。

(2) 在调查过程中缺少对研究区不同深度土样的矿物组成分析,难以对地下水渗流过程中离子含量变化做出更确切的推断。

(3) 在取样环节缺少非灌溉期的取样工作,不能将其与灌溉期的地下水水质进行综合对比分析。

参考文献(References):

- [1] 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):44-46,52. (SONG Hai bo, ZHANG Zhao ji, FEI Yu hong, 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): 44-46, 52. (in Chinese))
- [2] 张素娥,李志军,孙先锋,等.河北省地下水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,2010,21(1):26-30. (ZHANG Su e, LI Zhi jun, SUN Xian feng, et al. Impact of invasion of salty groundwater into fresh groundwater in Hebei Province[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(1): 26-30. (in Chinese))
- [3] 郭永海,沈照理,钟佐桑.河北平原深层碱性淡水形成的水文地球化学模拟-以保定、沧州地区为例[J].地球科学-中国地质大学学报,2002,27(2):157-162. (GUO Yong hai, SHEN Zhao li, ZHONG Zu shen, et al. Hydrogeochemical modeling for the formation of deeply lying alkaline fresh groundwater in Hebei Plain: a Case Study in Baoding and Cangzhou Districts[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 157-162. (in Chinese))
- [4] 牟纯儒,张建平.河北省典型区咸淡水界面下移现状及其入侵机制分析[J].河北水利水电技术,2002,(1):37-39. (MOU Chun ru, ZHANG Jian ping. An analysis of down movement status of the fresh saline groundwater interface and its mechanism in a typical area in Hebei[J]. Hebei Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, (1): 37-39. (in Chinese))
- [5] 周晓妮,刘少玉,王哲,等.华北平原典型区浅层地下水化学特征及可利用性分析-以衡水为例[J].水科学与工程,2008(2):56-59. (ZHOU Xiaoni, LIU Shaoyu, WANG Zhe, et al. The chemical characteristics and available analysis of shallow groundwater in the typical area of plain of North China take Hebei in example[J]. Water Science and Engineering Technology, 2008(2): 56-59. (in Chinese))
- [6] 赵全升,冯娟,安乐生.德州市浅层地下水水质演化[J].吉林大学学报:地球科学版,2010,40(5):1075-1082. (ZHAO Quansheng, FENG Juan, AN Le sheng. Shallow groundwater quality evolution in Dezhou City[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(5): 1075-1082. (in Chinese))
- [7] 费宇红,张兆吉,宋海波,等.华北平原地下水咸水垂向变化及机理探讨[J].水资源保护,2009,25(6):21-23. (FEI Yu hong, ZHANG Zhao ji, SONG Hai bo, 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))
- [8] 李海涛.衡水市地下水水质变化趋势预测分析[J].水科学与工程技术,2011,(3):35-37. (LI Hai tao. Analysis of trend prediction of Hengshui City groundwater quality[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2011, (3): 35-37. (in Chinese))
- [9] 宋海波.华北平原典型区地下水水质及咸淡水界面变化研究[D].北京:中国地质科学院,2006. (SONG Hai bo. Research on the change of groundwater quality and the interface of salt and fresh water in the representative area of North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese))
- [10] 邵景力,赵宗壮,崔亚莉,等.华北平原地下水流模拟及地下水资源评价[J].资源科学,2009,31(3):361-367. (SAO Jing li, ZHAO Zong zhuang, CUI Ya li, et al. Application of groundwater modeling system to the evaluation of groundwater resources in North China Plain[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 361-367. (in Chinese))
- [11] 张光辉,陈宗宇,费宇红.华北平原地下水形成与区域水文循环演化的关系[J].水科学进展,2000,11(4):415-420. (ZHANG Guang hui, CHEN Zong yu, FEI Yu hong. Relationship between the formation of groundwater and the evolution of regional hydrologic cycle in North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 415-420. (in Chinese))
- [12] 高业新,张冰,崔浩浩.包气带水入渗过程中水化学组分运移规律研究[J].水文地质工程地质,2014,41(2):1-6. (GAO Ye xin, ZHANG Bing, CUI Hao hao. A study of the migration of chemical composition in vadose water infiltration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 1-6. (in Chinese))
- [13] 宋洋,左兰丽,谷洪彪.人类活动影响下衡水市地下水环境演化进程分析[J].防灾科技学院学报,2010,12(3):33-39. (SONG Yang, ZUO Lan li, GU Hong biao, et al. Groundwater environment evolution process analysis under the influence of human activities in Hengshui City[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2010, 12(3): 33-39. (in Chinese))
- [14] 毕二平,母海东,陈宗宇,等.人类活动对河北平原地下水水质演化的影响[J].地球学报,2001,22(4):365-368. (BI Er ping, MU Hai dong, CHEN Zong yu, et al. Impacts of human activities on the evolution of groundwater quality in Hebei Plain[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(4): 365-368. (in Chinese))

(下转第100页)

- Science and Technology, 2007, 32(5): 87-90. (in Chinese)
- [10] 冯国一, 王海军, 唐涛. 坎深和入池能量对跌坎型底流消能工流态影响的数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(2): 69-71. (FENG Guo yi, WANG Hai jun, TANG Tao. Numerical simulation on the influence of step down depth and intake energy to the flow pattern of step down hydraulic jump dissipater[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2008, 6(2): 69-71. (in Chinese))
- [11] 孙双科, 柳海涛, 夏庆福. 跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1188-1193. (SUN Shuang ke, LIU Hai tai, XIA Qing fu. Study on stilling basin with step down floor for energy dissipation of hydraulic jump in high dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1188-1193. (in Chinese))
- [12] 郑雪, 付腾吉, 张闻辉, 等. 跌坎深度对跌坎型底流消能工水力特性影响的数值模拟分析[J]. 昆明理工大学学报, 2010, 35(2): 51-55. (ZHENG Xue, FU Teng ji, ZHANG Wen hui, ZHONG Zhi lei, et al. Numerical simulation analysis of step down depth influence on hydraulic characteristics of energy dissipater with step down floor[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2010, 35(2): 51-55. (in Chinese))
- [13] 郑雪. 跌坎型底流消能工的水力计算研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010. (ZHENG Xue. Hydrodynamic calculation of falling sill bottom follow energy dissipater[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese))
- [14] 付腾吉, 张闻辉, 郑雪, 等. 入池角度对跌坎型底流消能工水力特性影响的数值模拟[J]. 云南水力发电, 2009, 25(3): 33-36. (FU Teng ji, ZHANG Wen hui, ZHENG Xue, et al. Numerical simulation of influence of intake angle on hydraulic characteristic of energy dissipater with step down floor[J]. Yunnan Water Power, 2009, 25(3): 33-36. (in Chinese))
- [15] 王海军, 赵伟, 杨红宣, 等. 跌坎型底流消能工水力特性的试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(10): 39-41. (WANG Hai jun, ZHAO Wei, YANG Hong xuan, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of underflow for energy dissipater with step down floor[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(10): 39-41. (in Chinese))
- [16] 李树宁. 跌坎消力池水力荷载研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (LI Shu ning. Research on hydrodynamic loads of stilling basin with drop sill[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [17] 李树宁, 杨敏, 董天松. 跌坎消力池水力荷载特性试验研究[J]. 水力发电报, 2014, 33(3): 138-142. (LI Shu ning, YANG Min, DONG Tian song. Experimental study on characteristics of hydrodynamic load in stilling basin with drop sill[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3): 138-142. (in Chinese))
- [18] 杨敏, 李会平, 李树宁. 跌坎消力池临底流速试验研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2013, 46(4): 343-346. (YANG Min, LI Hui ping, LI Shu ning. Testing study on underflow velocity of stilling basin with drop sill[J]. Journal of Tianjin University: Natural Science and Engineering Technology, 2013, 46(4): 343-346. (in Chinese))
- [19] 王海军, 张强, 唐涛. 跌坎式底流消能工的消能机理与水力计算[J]. 水利水电技术, 2008, 39(4): 46-48. (WANG Hai jun, ZHANG Qiang, TANG Tao. Energy dissipation mechanism and hydraulic calculation of falling sill bottom follow energy dissipater[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(4): 46-48. (in Chinese))
- [20] 张祖新, 廖桂英, 喻畅. 带跌坎的消力池充水过程水力特性的试验研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 49-52. (ZHANG Zu xin, LIAO Gui ying, YU Chang. Experimental investigation on hydraulic characteristics of stilling basin with drops during water filling process[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 49-52. (in Chinese))

(上接第 61 页)

- [15] 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. (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))
- [16] 张宗祜, 张光辉, 任福弘, 等. 华北平原区域地下水演化过程及其与相邻层圈的相互作用[C]. 北京: 中国地质学会, 2006: 39-40. (ZHANG Zong hu, ZHANG Guang hui, REN Fu hong, et al. The process of evolution in North China Plain and its interaction with the adjacent spheres[C]. Beijing: geological society of China, 2006: 39-40. (in Chinese))
- [17] 张宗祜, 施德鸿, 任福弘, 等. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 1997, 27(2): 168-173. (ZHANG Zong hu, SHI De hong, REN Fu hong, et al. Evolution of quaternary groundwater system in North China Plain [J]. Science of China: Series D: Earth Science, 1997, 27(2): 168-173. (in Chinese))
- [18] 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. (GAO Ye xin. Study on groundwater hydraulic connection different aquifers under mass pumped conditions in typical area North China Plain[D]. Beijing: Chinese Academy Of Geological Sciences, 2008. (in Chinese))
- [19] Salifu A, Petrusovski B, Ghebremichael K, et al. Multivariate statistical analysis for fluoride occurrence in groundwater in the Northern region of Ghana[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2012, 140/141(34-44).
- [20] 冯欣, 张亚哲. 深圳地区地下水离子比例系数分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2014, (4): 18-20, 24. (FENG Xin, ZHANG Ya zhe. An analysis of the ions ratio coefficients of groundwater in Shenzhen Area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, (4): 18-20, 24. (in Chinese))