

民勤地下水水化学特征和矿化度的时空变化

刘文杰^{1,2}, 苏永中^{1,2*}, 杨荣^{1,2}, 吕晓东^{1,3}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所黑河生态水文与流域科学重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域综合研究站, 兰州 730000; 3. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070)

摘要: 为了遏制民勤生态环境恶化的趋势, 促进石羊河流域经济社会的可持续发展, 当地政府 2001 年和 2006 年分别开始实施了关井压田节水措施和石羊河下游放水工程. 以此为背景, 于 2008 年采集 65 个民勤地下水水样, 对地下水中的主要离子含量进行测试分析, 利用传统的统计学分析方法研究了地下水的水化学特征. 结果表明, 民勤地下水中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 浓度分别为 (921 ± 1042) 、 (241 ± 211) 、 (282 ± 123) 、 (4.7 ± 11.7) 、 (468 ± 599) 、 (156 ± 166) 、 (142 ± 89) 和 (17.6 ± 34.5) mg/L, 沿地下水水流方向, 它们的浓度均呈现增加的趋势. 2008 年民勤地下水矿化度为 (2.2 ± 1.9) g/L; 地下水的类型主要属于 SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ - Mg^{2+} 型水. 地下水中 NO_3^- 的平均浓度为 (8.1 ± 9.9) mg/L, 有 1.54% 的水样中硝态氮含量超过了国家一级饮用水标准. 结合 2002 年和 2005 年同期的矿化度资料, 利用地统计学方法, 对民勤 2002 年以来矿化度的时空变异规律进行了研究. 矿化度的 Kriging 插值结果表明, 在空间分布上, 矿化度呈从南到北逐渐升高的格局; 在时间变化上, 对南部区域, 2005 年矿化度较 2002 年有所上升, 2008 年较 2005 年有所下降; 北部区域变化情况则相反. 单一的节水措施对地下水没有明显改善作用, 石羊河放水加大了红崖山水库的储水量, 对民勤地下水有较好的改善作用.

关键词: 地下水; 水文化学; 矿化度; 地统计学; 民勤县

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2911-07

Hydrochemical Characteristics and Spatial-temporal Variation of Mineralization for the Groundwater in Minqin Oasis

LIU Wen-jie^{1,2}, SU Yong-zhong^{1,2}, YANG Rong^{1,2}, LÜ Xiao-dong^{1,3}

(1. Heihe Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of Soil, Fertilizer and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to curb the deterioration of ecological environment and promote the economic and social sustainable development of Shiyang River Basin, the Minqin government implemented water-saving measures of the shut-in and pressure fields and water discharge engineering in Shiyang River downstream in 2001 and in 2006, respectively. Sixty-five groundwater samples were collected in Minqin County in 2008 and the concentrations of major ions were analyzed in laboratory. The hydrochemistry characteristic of the groundwater was studied by traditional statistical analysis method. Results indicated the concentrations of the major ions, such as SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} and K^+ in the groundwater samples, were (921 ± 1042) , (241 ± 211) , (282 ± 123) , (4.7 ± 11.7) , (468 ± 599) , (156 ± 166) , (142 ± 89) and (17.6 ± 34.5) mg/L, respectively. There was increasing tendency for major ion concentrations along the groundwater flow direction. The groundwater mineralization was (2.2 ± 1.9) g/L in 2008. The type of water samples in Minqin oasis mainly belonged to SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ - Mg^{2+} . The average concentration of the NO_3^- was (8.1 ± 9.9) mg/L in the groundwater of Minqin, and the nitrate-N content was over 10 mg/L in 1.54% of all of water samples, which was unsuitable for drinking. Based on the data of groundwater mineralization in 2002, 2005 and 2008, the spatial-temporal variations of groundwater mineralization were studied by geo-statistical analysis method. Kriging interpolation results showed that groundwater mineralization at the spatial distribution scale were took on a gradual increase pattern from south to north. As for the change trend of groundwater mineralization in south area of Minqin County, there was increasing trend from 2002 to 2005, but decreasing trend was occurred from 2005 to 2008. Change trend of groundwater mineralization in north area of Minqin oasis was opposite to that of in south area. There was decreasing trend for the groundwater mineralization in south area from 2005 to 2008, which was due to the impact on water discharge in Shiyang River Basin. There was no significant improvement for groundwater by single water-saving measure, but the quality of groundwater was improved after water discharge in Shiyang River Basin.

Key words: groundwater; hydrochemistry; mineralization; geostatistics; Minqin County

收稿日期: 2008-11-09; 修订日期: 2009-04-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD46B06); 国家自然科学基金项目(30670375)

作者简介: 刘文杰(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农业生态学, E-mail: liuwenjie523@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: suyz@ns.lzb.ac.cn

随着人口的增长,地表水已不能满足人们的生产和生活需要,因此地下水的使用量逐年增加^[1].近年来,地下水的不合理利用已引起了一系列生态问题^[2~8].为了促进区域可持续发展,地下水的研究已成为国内外研究的热点问题^[9~18].地下水水化学研究是地下水资源质量评价的重要内容,它对流域地下水资源利用和管理及其有关的生态环境保护与建设都具有重要的意义.

民勤盆地位于河西走廊石羊河流域下游,隶属于甘肃省武威地区,是我国典型的荒漠绿洲,水资源问题是该区域生态经济持续发展的瓶颈.有关民勤地下水水化学特征方面的研究,已有少量报道^[19~24],但主要集中在 2001 年之前,而民勤实施节水(2001 年)和石羊河实施放水(2006 年)措施后,有关于地下水水化学特征和矿化度变化的研究报道较为少见.本研究分析了 2008 年民勤地下水中的主要离子含量和水化学特征,探讨了 2002 年以来地下水矿化度的变化趋势,目的是研究节水和放水措施对矿化度变化趋势的影响,旨在为民勤制定合理的绿洲发展计划和维持绿洲的生态环境稳定提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

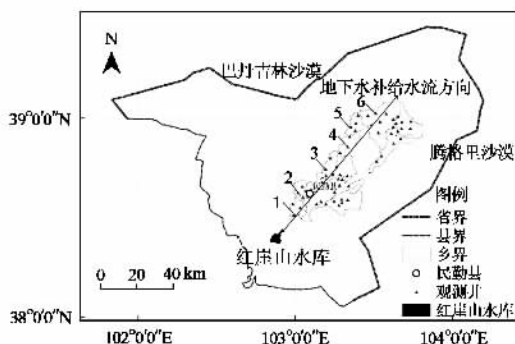
民勤绿洲位于甘肃省石羊河下游($102^{\circ}45' \sim 103^{\circ}55'E$, $38^{\circ}20' \sim 39^{\circ}10'N$),绿洲面积约 $2\,381\text{ km}^2$, 占全县土地总面积的 15%.民勤盆地属温带内陆河干旱气候区,多年平均降水量为 115 mm 左右,蒸发量为 2 644 mm,天然降水对地下水的直接补给作用较小.年平均气温为 7.8°C ,最高气温 38.1°C ,无霜期 139 d;年平均风速 2.8 m/s ,最大风速 31 m/s .种植作物以春小麦和夏玉米等粮食作物为主,兼种棉花、籽瓜、茴香等经济作物,土壤类型为绿洲灌淤土.

民勤盆地位于河西走廊石羊河流域下游,其西面、北面和东面均被巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠包围,南靠武威盆地,北盆地为民勤-潮水盆地.该区域降水稀少,蒸发作用非常强烈;受南部红崖山、阿拉古山,西部龙首山和北部北山褶皱带及深大断裂的阻隔屏障作用,盆地外围地下水对盆地含水层的侧向潜流补给甚微^[20].天然条件下,来自石羊河的地表水是盆地地下水的主要补给来源,地表水通过红崖山鞍部进入民勤盆地,大量入渗转化为地下水^[20].近年通过红崖山水库调节进入该盆地的河水,大部分纳入渠系引灌,地下水补给主要是红崖山水库渗漏及灌溉水的回渗,主要排泄方式为强烈潜

水蒸发、植物蒸腾和人为开采.

1.2 研究方法

2008 年 7 月,在民勤绿洲采集 65 个观测井水样,采样过程中用 GPS 记录样点的地理坐标,采样点的分布情况见图 1.民勤盆地地下水主要的补给来源是石羊河经红崖山水库后的渠系入渗水,在人工开采环境下地下水循环交替强烈,地下水的补给主要接受南部及西部的地下径流补给,地下水运动方向是由南向北^[20,25,26].根据采样点的位置,选取 6 个地下水补流水流方向的观测井水样(分别位于:1 薛百乡、2 大坝、3 大滩、4 红柳元、5 红沙梁和 6 西渠),进行主要离子浓度变化和矿化度的时空变化分析.



沿地下水补流水流方向:1 薛百乡、2 大坝、3 大滩、4 红柳元、5 红沙梁和 6 西渠

图 1 民勤绿洲地下水矿化度观测井分布

Fig.1 Distribution of sampling wells for monitoring groundwater mineralization in Minqin oasis

民勤从 2001 年开始计划实施关闭机井、退耕还林、衬砌各级输水渠道等一系列措施,用于减少民勤地下水的开采量;根据 2005 年甘肃省人民政府文件《关于石羊河流域水资源分配方案及 2005~2006 年度水量调度实施计划》,2006 年实施了石羊河对下游民勤的放水工程,以此缓解盆地缺水局势.为了研究节水和放水对民勤地下水的影响,选取了 2002、2005 和 2008 年 3 个时间段来分析地下水矿化度的变化趋势.2002 和 2005 年的水样矿化度资料来源于民勤县水利局,水样采集时间与 2008 年一致.为了贯彻中央和地方政府的节水关井政策,民勤盆地北部的部分机井在 2008 年已被关闭,所以北部区域的采样点位置与 2002、2005 年的有一定差异,而南部区域的(泉山镇以南)的采样点与前几年的采样点保持一致,特此说明.

采集水样时,先用水样将预先清洗的样品瓶冲洗 3 次后装样,密封后带回实验室低温保存,直至分

析.样品在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所土壤与水化学分析实验室中分析,分析的前 1 d,将样品取出在室温下自然融化,测试的项目包括: CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NO_3^- 、 F^- 、 Br^- 、pH 值和电导率(electrical conductivity, EC).其中: CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 测试方法为酸碱滴定法; Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 F^- 、 Br^- 测试方法为离子色谱法(792 Basic IC); Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 测试方法为 EDTA 滴定法; K^+ 、 Na^+ 测试方法为火焰原子吸收分光光度法(Corning 410);矿化度等于八大离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)的质量浓度总和;pH 值用电位法测定;电导率用电导仪测定.

分析测试有关水文化学参数后,利用 SPSS (17.0)软件进行了统计分析和相关性分析.利用 Aquachem 软件中的 Piper 模块绘制地下水水文化学类型图,对地下水的水化学特征进行分析.利用 2002、2005 和 2008 年的矿化度资料,结合 Arcgis 软件作出矿化度的 Kriging 插值图,对矿化度的时空分布特征进行研究.

2 结果与分析

2.1 地下水主要离子特征

对 2008 年民勤绿洲范围内的 65 个观测井水样的有关水文化学参数进行统计分析,结果见表 1.

表 1 2008 年地下水水化学参数的统计特征值 (n = 65)
Table 1 Statistics of hydrochemical parameters of groundwater for Minqin County in 2008 (n = 65)

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
$\text{CO}_3^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	77.4	4.7	11.7	2.52
$\text{HCO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	21	660	282	123	0.43
$\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	17	852	241	211	0.88
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1	5 094	921	1 042	1.13
$\text{Ca}^{2+}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	497	142	89	0.62
$\text{Mg}^{2+}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	824	156	166	1.07
$\text{K}^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.6	250	17.6	34.5	1.96
$\text{Na}^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	2 500	468	599	1.28
矿化度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.13	9.5	2.2	1.9	0.85
$\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.25	59.8	8.01	9.9	1.23
$\text{F}^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0.41	0.09	0.09	1.02
$\text{Br}^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0.61	0.13	0.13	1.04
pH	6.8	8.7	8.0	0.3	0.03
$\text{EC}/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	0.02	3.1	1.4	0.7	0.53

对于阴离子(Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-}),民勤地下水中 SO_4^{2-} 的含量最高,平均为 921 mg/L; CO_3^{2-} 的含量最低,平均为 4.7 mg/L.对于阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+), Na^+ 的含量最高,平均为 468 mg/L; K^+ 的含量最低,平均为 17.6 mg/L.民勤地下水中的 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 的平均含量分别为 282、241 和 142 mg/L,它们的变异系数相对较小,均小于 1,说明它们在地下水中的含量相对比较稳定.地下水 NO_3^- 含量在 0.25 ~ 59.75 mg/L,平均为 8.1 mg/L.地下水中 F^- 、 Br^- 含量平均为 0.09 mg/L 和 0.13 mg/L. pH 值为 8.0,呈现出弱碱性.电导率平均为 1.4 mS/cm.民勤地下水矿化度介于 0.13 ~ 9.5 g/L,平均值为 2.2 g/L.

从图 2 可以看出,大部分地下水样属于 SO_4^{2-} - Cl^- 型水;从 Piper 三线图看,部分地下水属于 Na^+ 型水,还有少量的 Mg^{2+} 型水和 Ca^{2+} 型水.总体来看,民

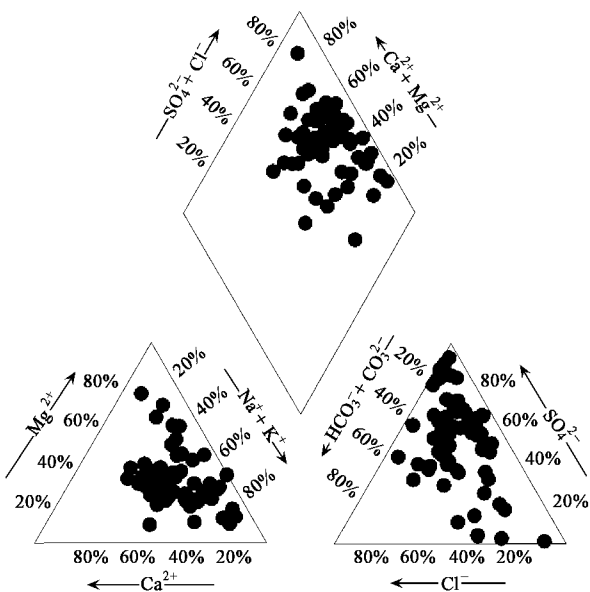


图 2 2008 年民勤地下水水化学成分的皮伯三线图
Fig.2 Piper diagram showing water chemistry of groundwater in Minqin

勤地下水水化学类型属于 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Na}^+\text{-Mg}^{2+}$ 型.

2.2 离子的相关性分析

表 2 为民勤 2008 年地下水中八大离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)、 NO_3^- 、 F^- 、 Br^- ，矿化度和 pH 值的 Pearson 相关系数.

从表 2 可以看出，在阴离子之间， SO_4^{2-} 与 Br^- 呈

表 2 2008 年民勤地下水水化学参数相关性系数矩阵¹⁾

Table 2 Correlation matrices of hydrochemical parameters of groundwater in Minqin in 2008

	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NO_3^-	矿化度
CO_3^{2-}	1									
HCO_3^-	0.334 **	1								
Cl^-	0.062	0.071	1							
SO_4^{2-}	0.391 **	0.481 **	0.118	1						
Ca^{2+}	0.191	0.153	0.376 **	0.628 **	1					
Mg^{2+}	0.336 **	0.650 **	0.154	0.703 **	0.497 **	1				
K^+	0.311 *	0.305 *	0.077	0.771 **	0.509 **	0.350 **	1			
Na^+	0.540 **	0.397 **	0.208	0.851 **	0.571 **	0.574 **	0.769 **	1		
NO_3^-	0.501 **	0.157	0.141	0.184	0.202	0.102	0.054	0.291 *	1	
矿化度	0.463 **	0.532 **	0.279 *	0.967 **	0.676 **	0.744 **	0.768 **	0.924 **	0.241	1
pH 值	-0.012	0.144	0.172	0.003	0.030	0.071	-0.036	0.108	-0.007	0.071

1) * 和 ** 分别代表 0.05 的显著水平和 0.01 的显著水平

相对较好的正相关关系，相关系数为 0.66. SO_4^{2-} 与阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 的相关性显著，相关系数在 0.60 以上，这表明离子主要来自各种硫酸盐. 各阳离子之间，均呈现出较显著的正相关关系. 其中，尤以 Na^+ 、 K^+ 间相关关系较为显著，相关系数在 0.70 以上. 矿化度与 SO_4^{2-} 、 Na^+ 的相关关系最为显著，相关系数达到 0.90 以上，这说明矿化度大小主要由水中的 SO_4^{2-} 、 Na^+ 浓度来控制. pH 值与 HCO_3^- 和 Cl^- 表现出正相关，但相关性不显著.

2.3 补给水流方向上水化学特征

沿补给水流方向，地下水中主要的离子浓度均呈现增加的趋势(图 3). 其中 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的浓度增加趋势最明显，离地下水补给区越远，其浓度越高.

对薛百乡、大坝、大滩、红柳元、红沙梁和西渠的观测井地下水水化学类型进行分析，结果表明：它们

的水化学类型依次为： $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-$ 、 Ca^{2+} 、 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Na}^+\text{-Cl}^-$ 、 $\text{Cl}^-\text{-Na}^+\text{-Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Na}^+\text{-Mg}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-$ 型水.

从 2002、2005 和 2008 年的矿化度分析结果(图 4)可以看出，沿地下水水流方向(从薛百乡到西渠)，地下水矿化度总体上呈现增加的趋势. 距离地下水补给源区越远，地下水矿化度越大. 本研究沿地下水补给方向，薛百乡、大坝、大滩、红柳元、红沙梁和西渠的观测井 2002 年的矿化度分别为 0.71、1.13、1.72、2.53、3.44 和 4.27 g/L; 2005 年分别为 1.18、1.35、3.12、2.99、3.55 和 4.52 g/L; 2008 年的分别为 0.77、0.90、0.91、2.04、3.26 和 4.29 g/L. 2005 年的矿化度较 2002 年分别增加了 67%、20%、81%、18%、3%和 6%; 2008 年矿化度较 2005 年分别降低了 35%、34%、71%、32%、8%和 5%. 虽然

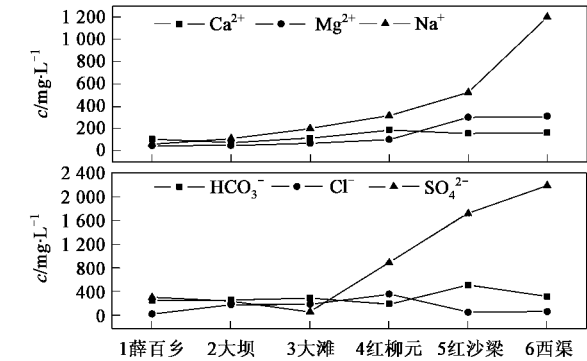


图 3 2008 年地下水中主要离子浓度沿地下水水流方向的变化趋势

Fig.3 Changing trends of major ion concentrations along the groundwater flow direction in 2008

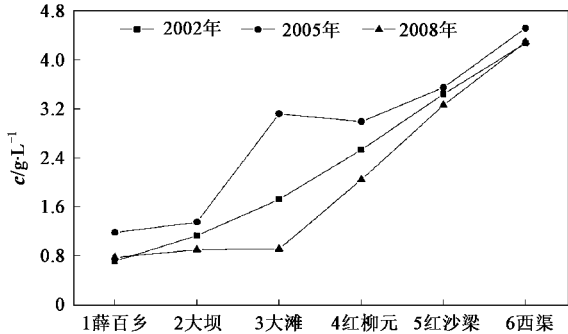


图 4 民勤 2002、2005 和 2008 年的矿化度沿地下水水流方向的变化趋势

Fig.4 Changing trends of mineralization along the groundwater flow direction in 2002, 2005 and 2008

2002~2005 年民勤实施了节水措施,但矿化度表现为升高趋势,这说明单一的节水措施对地下水没有明显的改善作用.2008 年的矿化度较 2005 年有明显的下降,说明石羊河放水对民勤地下水有一定的改善作用.

2.4 矿化度分布特征及其变化

地下水矿化度的 Kriging 插值结果(图 5)表明:从整个盆地的分布格局来看,2002、2005 和 2008 年地下水矿化度的分布趋势一致,均呈现出从南到北逐渐升高的分布格局.

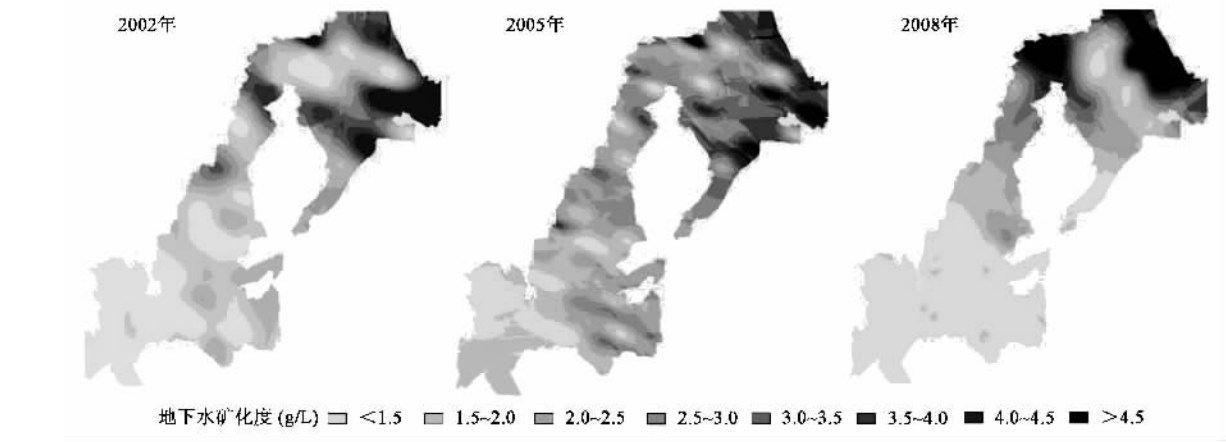


图 5 2002、2005 和 2008 年民勤绿洲地下水矿化度分布

Fig.5 Groundwater mineralization map of Minqin oasis in 2002, 2005 and 2008

从时间变化来看,对于盆地的南部,从 2002~2005 年,再到 2008 年,矿化度呈现先上升后下降,这与补给水流方向上观测井水样的分析结果一致;对于盆地北部湖区,矿化度的变化相对比较复杂,先表现出下降趋势,后表现出升高趋势,形成局部高矿化度区(图 5).

3 讨论

3.1 地下水水化学特征及其变化趋势

本研究结果表明,民勤地下水中含量最高的阴离子和阳离子分别为 SO_4^{2-} 、 Na^+ (见表 1),浓度范围分别为 1~5 094 mg/L 和 0~2 500 mg/L.马妮娜等^[28] 2006 年对民勤西面雅布赖盐场的 8 口井地下水进行了分析, SO_4^{2-} 和 Na^+ 浓度分别为 42~2 881 mg/L 和 175~3 634 mg/L,这 2 种离子的浓度水平变化范围均小于本研究结果.本研究发现,沿着地下水水流方向,水中主要的离子浓度均呈现增加的趋势,其中以 SO_4^{2-} 和 Na^+ 增加趋势最明显(如图 3).地下水从补给区到径流区,再到排泄区,阳离子 Na^+ ,阴离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 在地下水化学成分中仍占绝对优势,这反映了干旱炎热条件下地下水构成的特点.陈功新等^[29]对公婆泉盆地地下水的研究也发现了类似规律.石培泽等^[20]对民勤地下水水化学特征进行了模拟,认为民勤地下水形成于山区,沿途经历了强烈的蒸发浓缩作用,形成了浅层高矿化盐水,水化学沿水

流路径以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 升高为主要的特征,水质在不断恶化. Na^+ 主要来自斜长石等含钠矿物的风化溶解,它在蒸发岩与粘土岩沉积地区也普遍存在;钻孔资料表明民勤盆地的岩质层普遍含有石膏, SO_4^{2-} 主要来自民勤盆地地下泥质岩层中石膏的溶解.此外盆地部分区域有大量芒硝的存在,也是地下水中 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的来源.地下水在从南向北运动过程中,经溶滤作用、离子交换等水文地球化学作用,地下水中的阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与粘土、亚粘土层的 Na^+ 进行交换,形成了以 Na^+ 为主的水质.

从图 3 看出,沿着地下水水流方向,民勤地下水的 HCO_3^- 有增加的趋势.这是因为地下水溶解了钙长石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)、白云石、泥灰石等的碳酸盐类沉积物,使地下水中的重碳酸根离子增大^[20].由于盆地北部地下水补给源少,再加上强烈的蒸发作用,形成了大面积的碱性水及弱碱性水,造成这些区域地下水的 pH 值偏高,pH 值介于 6.8~8.7 之间.

赵华等^[26]对民勤地下水水化学分布特征进行了研究,沿水流方向,自西南的 SO_4^{2-} - Mg^{2+} - Na^+ 型逐渐过渡到 SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ 型,到北部的 Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+ 型水.本研究也表现出相近的规律,总体上看,民勤地下水水化学类型属于 SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ - Mg^{2+} 型水.本研究发现部分观测井地下水是 Ca^{2+} 型水,这在以往的文献中未见报道.这可能是受石羊河对下游的

民勤盆地放水的影响,红崖山水库储水量增加使民勤的地下水化学特征发生了改变.前期研究表明,红崖山水库对周围地下水乃至生态水文环境有一定的影响^[19].随着红崖山水库储水量增加,受水库的渗透补给水作用影响,地下水在由南向北径流补充过程中发生了强烈的水岩(钙长石和水)作用;另一方面,由于泥质岩层中石膏的溶解,导致该区域地下水中 Ca^{2+} 浓度不断增加,也会导致 Ca^{2+} 型水的出现.

观测井水样中 NO_3^- 含量范围为 0.25 ~ 59.75 mg/L,平均为 8.1 mg/L.本研究发现大部分水样的 NO_3^- -N 含量在 10 mg/L 以下,但仍有 1.54% 的样本中 NO_3^- -N 含量超标.马妮娜等^[28] 2006 年在雅布赖盐场的 3 口井地下水检出了 NO_3^- ,其浓度范围为 13.03 ~ 47.19 mg/L.本研究采集的水样均在农田灌溉区,远离工业和生活区,所以基本上排除是工业源、生活污染.甘肃省农科院的统计资料表明,民勤盆地在 1980 年施用化肥量为 2×10^4 t;2000 年达到了 7.64×10^4 t;2007 年达到了 1.29×10^5 t,其中氮肥用量 6.3×10^4 t.盆地氮肥使用量日益增大,而盆地大部分耕作区域采用的是传统漫灌,没有被作物吸收的氮元素很容易通过灌溉水排入地下水中.另外,在民勤渠水水样中检测 NO_3^- 含量为 0.03 mg/L,这说明地下水 NO_3^- 含量与地表水的直接污染关系不大.从以上分析可见,民勤县的确态氮污染应该是由于长期大量的化学氮肥施用和不合理的灌溉方式所致.在石羊河流域,民勤的上游地区地下水已经受到了硝态氮污染的威胁,原因是大量含氮化学肥料的使用所致^[27].

3.2 地下水矿化度分布特征及其变化

20 世纪末,民勤盆地绿洲及外围区受到了强烈的人类活动干扰,部分区域水位不断下降,水质也逐渐恶化;随着时间的推移,民勤盆地地下水的总体的变化规律是地下水的矿化度处于逐渐升高的趋势,咸水面积由东北向西南推进,淡水和微咸水的面积逐渐缩小^[26].对沿地下水水流方向的 6 个观测井水样矿化度进行分析,结果表明:2005 年地下水矿化度比 2002 年分别增加了 67%、20%、81%、18%、3% 和 6%,说明单一的节水措施对地下水没有明显的改善作用;2008 年比 2005 年分别降低了 35%、34%、71%、32%、8% 和 5%,说明石羊河放水加大了红崖山水库的储水量,对民勤地下水有较好的改善作用.由此可见,盆地中南部地下水可能受石羊河放水的影响,矿化度逐年升高的趋势有所减缓,部分

区域有降低的趋势.

李小玉等^[22]和肖笃宁等^[23]运用地统计学方法,对地下水矿化度的空间结构和变异特征进行了较好的模拟.本研究结果表明,民勤地下水矿化度的 Kriging 插值图较好地反映了空间分布特征和时间变化趋势,民勤地下水矿化度从南到北逐渐增大(图 5).北部靠近荒漠远离补给源区的矿化度普遍较高,南部靠近补给源区的矿化度较低.这种规律在黑河下游额济纳绿洲地下水也有表现^[30],是因为它们都处于干旱半干旱区,降雨量少,蒸发量大,离于地下水补给源区越远,矿化度越大.有研究者认为民勤的这种分布格局取决于盆地的地质结构和地理分布特征^[23],笔者认为,北部区域的地下水补给来源少,近年持续大量的地下水开采对地下水质的影响也日趋明显,使地下水反复消耗和浓缩,也是导致这种分布格局的原因之一.

从 2002 ~ 2005 年,再到 2008 年,民勤南部矿化度呈现先上升后下降(见图 5).矿化度从 2002 ~ 2005 是升高趋势,说明单一的节水措施对地下水没有明显的改善作用;矿化度从 2005 ~ 2008 年是下降趋势,这可能是受 2006 年开始实施的石羊河放水工程的影响.北部的变化比较复杂,2005 年相对 2002 年的矿化度有所下降,而 2008 年的又出现大面积的高矿化度区(见图 5).2008 年的分布情况与肖笃宁等^[23]研究者的预测情况相吻合.盆地北部矿化度变化原因:该区地下水属于咸水带位,本身矿化度程度高,由于近年外调水的水量有所增加,在灌渠周边形成淡水区,对该区域形成了一定的缓冲作用,使 2005 年的矿化度较大区域的分布比较分散;该区域离红崖山水库较远,受益于地下水补给作用小,由于大量开采地下水,破坏压力均衡造成上层苦水越流补给,引起矿化度升高,也会导致局部区域出现高矿化度的现象.另外,2008 年在盆地北部的采样点与前 2 次不完全一致,这给比较分析引入了不确定的因素.由于石羊河地下水补给主要来源于盆地西南部,盆地南、北区域矿化度在时间变化上的差异表明,石羊河放水对民勤盆地地下水产成了一定的影响.

4 结论

(1)民勤地下水中浓度最高的阴阳离子分别是 SO_4^{2-} 和 Na^+ .沿着地下水水流方向,地下水中主要离子的浓度均呈现增加的趋势.

(2)统计分析和 Piper 三角图结果表明,民勤地

下水主要属于 SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ - Mg^{2+} 型水;石羊河放水增加了红崖山水库的储水量,使民勤部分区域出现了 Ca^{2+} 型水.

(3)民勤部分地下水水样(总样本的 1.54%)中的硝酸根离子浓度含量超过了国家一级饮用水标准,不适合饮用.

(4)民勤矿化度的空间分布呈现从南到北逐渐升高的格局.从时间变化上看,民勤南部地下水矿化度有下降的趋势.

(5)单一的节水措施对地下水没有明显的改善作用,而通过石羊河放水,加大了红崖山水库的储水量,对地下水有较好的改善作用.

参考文献:

[1] Ahn H I, Chon H T. Assessment of groundwater contamination using geographic information system [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 1999, **21**(3): 273-289.

[2] Francisco S M, Pedro A A, Antonia G F, *et al.* Assessment of groundwater quality by means of self-organizing maps: Application in a semiarid area [J]. *Environmental Management*, 2002, **30**(5): 716-726.

[3] 陈永金,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1299-1304.

[4] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, **83**(1): 73-84.

[5] Wang M X, Liu G D, Bao Y H, *et al.* Prediction of agriculture derived groundwater nitrate distribution in North China Plain with GIS-based BPNN [J]. *Environmental Geology*, 2006, **50**(5): 637-644.

[6] 崔学慧,李炳华,陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1806-1810.

[7] 徐海量,陈亚宁,杨戈. 塔里木河下游生态输水对植被和地下水位的影响[J]. *环境科学*, 2003, **23**(4): 18-22.

[8] 马金珠,魏红. 民勤盆地地下水资源开发引起的生态与环境问题分析[J]. *干旱区研究*, 2003 年, **20**(4): 261-265.

[9] 何江涛,李烨,刘石,等. 浅层地下水氯代烃污染的天然生物降解 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 121-125.

[10] 荆小茹,曹勤,刘京,等. 中国部分环境保护重点城市集中式饮用水源水质评价 [J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 961-967.

[11] 黄冠星,孙继朝,王珊,等. 珠江三角洲平原典型区地下水中铅的污染特征 [J]. *环境化学*, 2008, **27**(4): 533-534.

[12] 姜月华,贾军元,许乃政,等. 苏锡常地区地下水同位素组成

特征及其意义 [J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2008, **38**(4): 493-500.

[13] 薛禹群,张幼宽. 地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 474-481.

[14] Ma J Z, Edmunds W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia [J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, **14**(7): 1231-1243.

[15] Wen X, Wu Y, Wu J. Hydrochemical characteristics of groundwater in the Zhangye Basin, Northwestern China [J]. *Environmental Geology*, 2008, **55**(8): 1713-1724.

[16] Gates J B, Edmunds W M, Ma J Z, *et al.* Estimating groundwater recharge in a cold desert environment in northern China using chloride [J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, **16**(5): 1431-2174.

[17] Kortatsi B K. Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2007, **13**(1): 41-74.

[18] Helstrup T, Jørgensen N O, Anoeng-Yakubo B. Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater from the Cretaceous-Eocene limestone aquifer in southern Ghana and southern Togo using hierarchical cluster analysis [J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, **15**(5): 977-989.

[19] 王琪,史基安,赵兴东,等. 石羊河流域地下水地球化学特征演化的计算机模拟研究[J]. *中国沙漠*, 2003, **23**(2): 160-164.

[20] 石培泽,马金珠,赵华. 民勤盆地地下水地球化学演化模拟 [J]. *干旱区地理*, 2004, **27**(3): 305-309.

[21] 宋冬梅,肖笃宁,张志城,等. 石羊河下游民勤绿洲生态安全时空变化分析[J]. *中国沙漠*, 2004, **24**(3): 335-342.

[22] 李小玉,宋冬梅,肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异[J]. *地理学报*, 2005, **60**(2): 319-327.

[23] 肖笃宁,李小玉,宋冬梅,等. 民勤绿洲地下水开采时空动态模拟[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2006, **36**(6): 567-578.

[24] 宋冬梅,肖笃宁,张志城,等. 甘肃民勤绿洲的景观格局变化及驱动力分析[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(4): 535-539.

[25] 李文鹏. 甘肃省民勤盆地深层淡水及表层咸水成因[J]. *地质评论*, 1991, **37**(6): 546-554.

[26] 赵华,马金珠,朱高峰,等. 甘肃省民勤盆地地下水环境变化及原因探讨[J]. *干旱区研究*, 2004, **21**(3): 210-214.

[27] 尉元明,朱丽霞,乔艳君,等. 干旱地区灌溉农田化肥施用现状与环境影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2003, **17**(5): 65-69.

[28] 马妮娜,杨小平. 巴丹吉林沙漠及其东南边缘地区水化学和环境同位素特征及其水文学意义[J]. *第四纪研究*, 2008, **28**(4): 702-711.

[29] 陈功新,张文,刘金辉,等. 中国西北中小型盆地天然地下水水化学特征—以公婆泉盆地为例[J]. *干旱区研究*, 2008, **25**(6): 812-817.

[30] 席海洋,冯起,司建华,等. 分水对额济纳绿洲浅层地下水水化学性质的影响[J]. *水土保持研究*, 2007, **14**(5): 135-137.