

贺兰山西麓典型干旱区绿洲地下水 水化学特征与演变规律

姜 凌, 李佩成, 郭建青

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对地下水资源过量开采而出现的绿洲水文生态问题, 以贺兰山西麓具有典型特征的内蒙古腰坝绿洲为研究对象, 分开采期、非开采期对地下水进行系统取样分析, 综合运用描述性统计、相关性分析、离子比例系数和 Piper 三线图示法, 全面系统地研究了地下水水化学的时空变异特征与演变规律。研究结果表明: ①季节变化对潜水和承压水水化学类型空间变异性影响较小, 潜水水文化学性质受外界因素干扰较大, 承压水受外界因素干扰较少; ②蒸发浓缩、阳离子交换和人为混合是控制研究区潜水质演化的主要水文化学过程; ③潜水子系统总溶解固体较高, 水化学类型变化也较复杂, 主要从 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型向 $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型演化。承压水水化学类型比较单一, 主要以低矿化度的 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型为主。

关键词: 干旱区绿洲; 地下水; 水化学类型; 时空变异; 演变规律

中图分类号: P641.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)03-0285-06

Hydrochemical Characteristics and Evolution Laws of Groundwater in Typical Oasis of Arid Areas on the West of Helan Mountain

JIANG Ling, LI Pei-cheng, GUO Jian-qing

(School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract The paper takes the Yaoba oasis of Alxa area on the west of Helan mountain as the typical study case, and the groundwater samples are analyzed systemically, then the descriptive statistics, the correlation matrices, the ratio coefficient of the main ions and the piper diagram are used to gain the better understanding of the spatial and the temporal variation of the hydrochemistry characteristics and the evolution laws of groundwater. The results show that: ①Hydrochemical spatial variability of unconfined and confined aquifer is almost not affected by seasonal variation, and the interference of external factors to hydrochemical character of unconfined aquifer is more obviously than confined aquifer; ②The following main hydrochemical processes are inferred to control the water quality of the groundwater system: the evaporative condensation, ion-exchange reactions, and mixing of the surface water with high salinity; ③There are high TDS contents and complicated hydrochemical types in unconfined aquifer, whose hydrochemical types evolve from $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ to $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$. The hydrochemical types of confined aquifer are simple, which mainly are $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+} \cdot \text{Ca}^{2+}$ with low-mineralization.

Key words: arid region oasis; groundwater; hydrochemical type; evolution character; evolution law

0 引言

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与其

有关的生态环境保护与建设都具有重要意义。地下水是水资源的重要组成部分, 在自然系统的循环过程中, 与其接触的岩石圈、生物圈和大气圈进行着极其复杂的物质、能量和信息交换, 水文化学特

收稿日期: 2008-12-20

基金项目: 国家科技攻关计划项目 (2002BA901A43)

作者简介: 姜 凌 (1977-) 女, 新疆乌鲁木齐人, 讲师, 工学博士研究生, 从事水文地球化学和环境化学教学与研究。E-mail: toiling@chd.edu.cn

© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

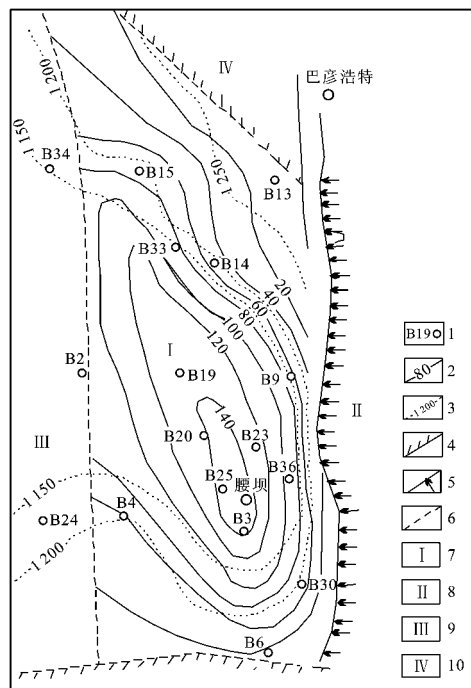
征在时空尺度上都发生不断地变化。因此,通过地下地下水水化学的时空变异特征与演变规律研究,可以更好地揭示地下水与环境的相互作用机制,为环境资源管理提供科学依据^[1-3]。

腰坝绿洲地处内蒙古西部,是典型的干旱区,荒漠绿洲景观明显。该区地表水资源极为贫乏,属无流区,地下水是当地的主要水资源,也是维系当地人民生产和生活最重要的因素。然而,随着水文情势的改变和人类活动的干扰,地下水系统的水动力条件和化学环境发生了深刻变化,破坏了原有地下水系统的流场和水化学场,水化学特征发生相应的变化,并形成了局部水化学异常区,地下水盐化作用日益明显,不仅减少了可利用水资源量,而且加剧了利用含盐量高的地下水灌溉所引起的土地盐碱化。因此,对这一地区地下水水化学特征及其演化规律进行研究有助于深入了解绿洲地下水水质的变化趋势,从更高层次上认识地下水环境问题。这不仅为当地地下水资源合理开发利用提供理论依据,而且对中国广大干旱区绿洲地下水资源合理开发利用和保护具有重要的理论指导意义和实用价值。

1 水文地质条件

一系列南北向及北西向、东西向断裂构造的切割使贺兰山西侧形成了多个构造台地与沉积盆地相间分布的格局。研究区所处的腰坝盆地,西接巴彦达莱盆地,以北及东分别为淖尔套台地和(贺兰)山前台地,以南以断层为界也是山前台地的一部分(图 1)。边界完全受断裂控制的腰坝盆地基底由第三系组成,盆地中心第四系厚度达 200 多米,边缘 130 余米,沉积物由下更新统(Q_1)至全新统(Q_4)的多个冲洪积扇组成。通过冲洪积扇的沉积韵律分析发现,本区第四纪以来气候是一个由湿变干的过程,冲洪积扇的规模逐渐退缩变小,因而,沉积物呈现剖面上由下至上、平面上由上游至下游颗粒逐渐变细的特征^[3]。

腰坝绿洲位于沉积盆地西南段冲洪积扇的中、下部地区,处于东经 $105^{\circ}34' \sim 105^{\circ}39'$ 、北纬 $38^{\circ}25' \sim 38^{\circ}36'$ 之间,总面积约 60 km^2 ,呈南北长度较大、东西宽度较小的长条形,沉积物组合具有多层结构。由此,可把第四系含水地层划分为两个含水组,上部第一含水组,含水层岩性为中细砂、粉细砂及细砂,含水砂层夹黏土相对隔水层,主要组成潜水和层间潜水含水层。其中,层间潜水分布于研究区中部大部



1—采样点; 2—含水层厚度等值线; 3—第三系顶板高程等值线; 4—隔水边界; 5—补给边界; 6—排泄边界; 7—腰坝盆地地下水系统; 8—10—与研究区相邻的地下水系统

图 1 腰坝第四纪盆地孔隙水贮存系统及采样点分布
Fig. 1 Quaternary Pore Water Storage System and the Sampling Locations of Yaoba Basin

分地区,含水组上部一般有 1~3 层黏土相对隔水层,但分布不稳定,厚度较小($1.5 \sim 1.7 \text{ m}$),不易形成区域稳定的承压水顶板,但对降水、灌溉水垂直入渗补给层间潜水会有较大阻隔作用。含水组底板黏土层,埋深 $35 \sim 51 \text{ m}$,高程 $1265 \sim 1268 \text{ m}$,厚度 $5 \sim 18 \text{ m}$,岩性较稳定。第二含水组岩性变化较大,从中细砂、中粗砂直至卵砾石层,含水层累计厚度 $30.58 \sim 54.05 \text{ m}$,砂层赋存承压水,顶板埋深为 $49.47 \sim 70.28 \text{ m}$,高程 $1240 \sim 1260 \text{ m}$,底板埋深 $137.7 \sim 206.58 \text{ m}$,高程 $1089.42 \sim 1145.3 \text{ m}$ 。

研究区地下水在天然条件下(未开采前)横向受东侧、南侧、北侧三边侧向补给,为已知水位、水头及变流量进水的二类混合边界,垂直方向有洪水入渗补给,主要分布在防洪坝以东单一潜水和西南及西北地区,上层为潜水下层为承压水区。研究区 102 m 深度内地下水开采层还受下层第四系承压水顶托越流补给,水头差为 1.23 m ,产生越流补给范围主要在研究区中部及西部。天然条件下研究区地下水从东北、东、东南向西径流,汇入陶苏湖区。开发地下水后形成降落漏斗,地下水以径流方

式汇入漏斗中心。开采期, 补给主要来自导水条件好的东部(防洪坝以东的冲洪积扇顶)和北部。非开采期, 漏斗基本依靠来自北部的地下水径流得以恢复, 东部尤其是东南部恢复最慢, 表明东部在开采期的补给主要消耗了储存资源, 来自西部、西南部的径流补给非常有限。

2 野外设计与测试方法

2.1 野外设计与取样方案

为了揭示影响和控制地下水水质演化和水—岩(土)作用、阳离子交换等水文化学过程, 首先在野外沿地下水流方向建立了水文化学剖面, 共打 16 眼观测井, 井间距 2 km 左右, 在同一观测点有 1 眼潜水井和 1 眼承压水井, 即 8 眼潜水井和 8 眼承压水井, 长期监测地下水水位、水质动态变化。在研究区共布置了 39 个取样点(包括水文化学剖面上的 16 眼观测井)(图 1), 分别在 2005 年的非开采期(3 月)和开采期(7 月)取样作有关水化学参数测试。

表 1 开采期潜水及承压水水化学参数统计特征值

| Tab. 1 Statistical Eigenvalue of Hydrochemical Parameters of Unconfined and Confined Aquifer During the Exploitation Period | | | | | | | | | | |
|---|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 项目 | 潜水 | | | | | 承压水 | | | | |
| | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 变异系数/ % | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 变异系数/ % |
| Na ⁺ | 67. 50 | 540. 00 | 170. 18 | 117. 26 | 68. 90 | 17. 94 | 124. 98 | 76. 93 | 16. 01 | 20. 81 |
| Ca ²⁺ | 35. 07 | 148. 69 | 73. 91 | 34. 02 | 46. 03 | 25. 89 | 80. 01 | 49. 96 | 17. 84 | 35. 71 |
| Mg ²⁺ | 29. 16 | 135. 59 | 79. 13 | 29. 72 | 37. 56 | 5. 23 | 30. 28 | 18. 02 | 2. 77 | 15. 35 |
| HCO ₃ ⁻ | 142. 02 | 262. 65 | 188. 80 | 27. 44 | 14. 53 | 144. 93 | 643. 97 | 373. 01 | 23. 46 | 6. 29 |
| Cl ⁻ | 53. 75 | 919. 11 | 231. 79 | 196. 95 | 84. 97 | 3. 52 | 53. 03 | 18. 95 | 8. 41 | 44. 39 |
| SO ₄ ²⁻ | 93. 19 | 733. 89 | 240. 10 | 153. 69 | 64. 01 | 0. 52 | 97. 11 | 18. 29 | 4. 33 | 23. 65 |
| TDS | 429. 00 | 2 237. 00 | 965. 67 | 486. 27 | 50. 36 | 215. 01 | 904. 02 | 522. 17 | 180. 67 | 34. 60 |
| pH | 7. 05 | 8. 34 | 7. 36 | 7. 69 | 104. 45 | 7. 60 | 8. 61 | 8. 03 | 8. 35 | 104. 02 |

表 2 非开采期潜水及承压水水化学参数统计特征值

| Tab. 2 Statistics Eigenvalue of Hydrochemical Parameters of Unconfined and Confined Aquifer During the Non-exploitation Period | | | | | | | | | | |
|--|---------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 项目 | 潜水 | | | | | 承压水 | | | | |
| | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 变异系数/ % | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 变异系数/ % |
| Na ⁺ | 66. 12 | 1 261. 02 | 394. 00 | 323. 72 | 92. 16 | 15. 23 | 119. 45 | 77. 65 | 17. 24 | 22. 20 |
| Ca ²⁺ | 36. 10 | 548. 21 | 187. 61 | 164. 28 | 87. 57 | 23. 14 | 42. 11 | 33. 21 | 4. 65 | 14. 00 |
| Mg ²⁺ | 24. 33 | 625. 54 | 219. 06 | 181. 95 | 83. 06 | 8. 98 | 69. 80 | 36. 08 | 6. 57 | 18. 20 |
| HCO ₃ ⁻ | 104. 82 | 338. 63 | 225. 47 | 71. 31 | 31. 63 | 160. 12 | 629. 52 | 405. 21 | 22. 08 | 5. 45 |
| Cl ⁻ | 42. 54 | 1 640. 51 | 668. 29 | 540. 09 | 80. 82 | 8. 08 | 64. 79 | 24. 19 | 11. 87 | 49. 07 |
| SO ₄ ²⁻ | 67. 21 | 1 393. 03 | 612. 34 | 388. 13 | 63. 38 | 0. 00 | 1. 98 | 0. 90 | 0. 20 | 22. 01 |
| TDS | 490. 80 | 4 831. 80 | 2 363. 99 | 1 383. 62 | 58. 53 | 218. 98 | 796. 74 | 534. 83 | 181. 95 | 34. 02 |
| pH | 7. 48 | 8. 90 | 7. 72 | 8. 04 | 104. 07 | 6. 91 | 7. 79 | 7. 51 | 7. 94 | 105. 74 |

2.2 测试项目及测试方法

测试项目包括Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、pH 值和总溶解固体(TDS), 样品测试在长安大学环工学院实验中心进行, 其中Na⁺、K⁺测试方法为火焰原子吸收分光光度法(GFU-202); Cl⁻、SO₄²⁻测试方法为离子色谱法(HLC-601); Ca²⁺、Mg²⁺测试方法为 EDTA 滴定法; HCO₃⁻、CO₃²⁻测试方法为酸碱滴定法; pH 值测试方法为电位法; 总溶解固体为计算值等于上述测试项目质量浓度的总和。

3 研究方法与结果分析

综合运用描述性统计、相关性分析、离子比例系数和 Piper 三线图示法, 全面系统地研究地下水水化学的时空变异特征与演变规律, 揭示控制地下水质量演变的主要水化学过程^[4-7]。

3.1 描述性统计分析

对 2005 年开采期和非开采期潜水和承压水水样有关水化学参数进行统计特征值分析(表 1、2)。

表 1、2 分析结果表明:

(1)2005 年不论是开采期还是非开采期,潜水和承压水主要离子成分变化趋势基本相同,即在开采期和非开采期潜水中阴、阳离子质量浓度最大的均为 Cl^- 和 Na^+ ,承压水中质量浓度最大的均为 HCO_3^- 和 Na^+ ,表明季节变化对水化学类型空间变异性影响较小。

(2)潜水水化学参数的变异系数都较承压水大,表明潜水的水文化学性质在空间上变异性大,受含水层介质、地形地貌、水文气象条件和人类活动等因素的影响较大,承压水受外界因素干扰较少。

(3)潜水中 HCO_3^- 的变异系数相对较小,反映其在潜水中含量的相对稳定性, Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的变异系数均较大,反映其在潜水中的质量浓度变化较大,其中 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的平均值和标准变差都较大,反映其在潜水中的绝对含量较大,为潜

水中的主要阴、阳离子,是决定潜水盐化作用的主要变量。而承压水水化学参数的变异系数均较小,反映其在水体中的含量变化较小,受外界因素干扰较少,同时也说明承压水的盐化作用非常微弱。

3.2 相关性分析

相关性分析可揭示地下水水化学参数的相似向异性及来源的一致性和差异性^[8-9]。分别计算开采期和非开采期研究区潜水、承压水的 Pearson 相关系数,其结果如表 3、4。

从表 3、4 可以看出:

(1)开采期和非开采期潜水中 Na^+ 、 Cl^- 与 TDS 呈显著的相关性,相关系数都在 0.9 以上,而 HCO_3^- 与 TDS、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 之间呈负相关关系,且 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 Na^+ 之间相关性较差。出现这种现象的原因是腰坝绿洲为潜水的径流、排泄区,蒸发浓缩起主导作用。地下水从贺兰山前的补给区向

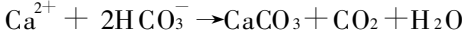
表 3 开采期和非开采期潜水水化学参数相关系数矩阵

| 项目 | 开采期 | | | | | | | | 非开采期 | | | | | | | |
|--------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|--------|--------------------|--------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|--------|--------------------|--------|
| | Ca^{2+} | Cl^- | HCO_3^- | Mg^{2+} | Na^+ | pH | SO_4^{2-} | TDS | Ca^{2+} | Cl^- | HCO_3^- | Mg^{2+} | Na^+ | pH | SO_4^{2-} | TDS |
| Ca^{2+} | 1.000 | 0.739 | -0.609 | 0.674 | 0.691 | -0.702 | 0.503 | 0.745 | 1.000 | 0.737 | -0.400 | 0.903 | 0.478 | 0.779 | 0.482 | 0.732 |
| Cl^- | | 1.000 | -0.438 | 0.736 | 0.977 | -0.750 | 0.679 | 0.950 | | 1.000 | -0.103 | 0.871 | 0.904 | 0.602 | 0.692 | 0.972 |
| HCO_3^- | | | 1.000 | -0.318 | -0.369 | 0.468 | -0.431 | -0.468 | | | 1.000 | -0.066 | -0.142 | -0.232 | -0.306 | -0.160 |
| Mg^{2+} | | | | 1.000 | 0.726 | -0.847 | 0.729 | 0.852 | | | | 1.000 | 0.599 | 0.745 | 0.450 | 0.821 |
| Na^+ | | | | | 1.000 | -0.677 | 0.730 | 0.954 | | | | | 1.000 | 0.381 | 0.798 | 0.925 |
| pH | | | | | | 1.000 | -0.575 | -0.770 | | | | | | 1.000 | 0.487 | 0.610 |
| SO_4^{2-} | | | | | | | 1.000 | 0.852 | | | | | | | 1.000 | 0.831 |
| TDS | | | | | | | | 1.000 | | | | | | | | 1.000 |

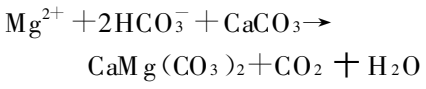
表 4 开采期和非开采期承压水水化学参数相关系数矩阵

| 项目 | 开采期 | | | | | | | | 非开采期 | | | | | | | |
|--------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|-------|--------------------|-------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|-------|--------------------|--------|
| | Ca^{2+} | Cl^- | HCO_3^- | Mg^{2+} | Na^+ | pH | SO_4^{2-} | TDS | Ca^{2+} | Cl^- | HCO_3^- | Mg^{2+} | Na^+ | pH | SO_4^{2-} | TDS |
| Ca^{2+} | 1.000 | 0.005 | 0.847 | 0.640 | 0.534 | 0.093 | 0.237 | 0.929 | 1.000 | 0.141 | 0.847 | 0.694 | 0.510 | 0.276 | -0.244 | 0.894 |
| Cl^- | | 1.000 | 0.331 | 0.621 | 0.664 | 0.138 | 0.101 | 0.446 | | 1.000 | 0.285 | 0.638 | 0.634 | 0.594 | 0.313 | 0.475 |
| HCO_3^- | | | 1.000 | 0.851 | 0.837 | 0.416 | -0.075 | 0.916 | | | 1.000 | 0.816 | 0.824 | 0.443 | -0.062 | 0.968 |
| Mg^{2+} | | | | 1.000 | 0.800 | 0.260 | 0.047 | 0.888 | | | | 1.000 | 0.746 | 0.511 | -0.146 | 0.866 |
| Na^+ | | | | | 1.000 | 0.506 | 0.013 | 0.901 | | | | | 1.000 | 0.718 | 0.271 | 0.893 |
| pH | | | | | | 1.000 | 0.331 | 0.397 | | | | | | 1.000 | 0.073 | 0.565 |
| SO_4^{2-} | | | | | | | 1.000 | 0.094 | | | | | | | 1.000 | -0.017 |
| TDS | | | | | | | | 1.000 | | | | | | | | 1.000 |

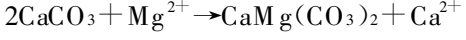
腰坝绿洲径流过程中,地下水的 Na^+ 质量浓度和 TDS 逐渐增高, pH 值随之增大。当 $\text{pH} > 7.4$ 和 $\text{TDS} > 600 \text{ mg/L}$ 时, Ca^{2+} 与 HCO_3^- 生成碳酸钙, 发生沉淀



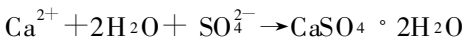
随着碱度升高, 促进白云石的生成, 发生沉淀



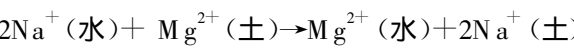
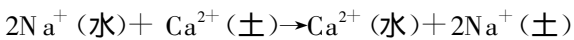
由于 Ca^{2+} 被除去, $w(\text{Mg}^{2+})/w(\text{Ca}^{2+})$ 升高, 当达到 6 以上时, 碳酸钙就会转化成白云石



当缺少过量的碱度时, 就会发生白云石化作用, 钙被释放出来, 并以石膏的形式沉淀下来



同时, 水中的 Na^+ 与土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进行离子交换, 导致 Na^+ 在土壤中积累



(2) 承压水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 HCO_3^- 呈正相关, 且相关系数较高。 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 与 TDS 之间的相关性也较高, 而且 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 是承压水的主要组分。这是由于在开采期和非开采期承压水的 TDS 平均值都较低, 分别为 522.17 mg/L 和 534.83 mg/L , 都小于 600 mg/L , 难以生成方解石 (CaCO_3) 和白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 的沉淀。

3.3 离子比例系数分析

在地下水的化学成分中, 各种组分之间的含量比例系数常常被用来研究某些水文地球化学问题。 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 系数称为地下水的成因系数, 是表征地下水中钠离子富集程度的一个水文地球化学参数。标准海水的 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 系数平均值为 0.85, 低矿化度水具有较高的 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 系数 ($c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-) > 0.85$), 高矿化度水具有较低的 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 系数 ($c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-) < 0.85$)。

从图 2 可以看出, 潜水水样分析点大部分位于直线 1:1 以上, 说明 Na^+ 的物质的量浓度基本上均大于 Cl^- 的物质的量浓度, 即 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 系数大于 1, 地下水在径流过程中不断通过水解和酸作用使岩石矿物风化溶解, 使 Na^+ 从长石中释放出来, 从而使 Na^+ 的物质的量浓度大于 Cl^- 的物质的量浓度。

从图 3 可以看出, $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 系数基本上

随着 TDS 的增加呈下降趋势, 说明 Na^+ 与含水层中黏土矿物吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进行离子交换, 导致地下水中的 Na^+ 的物质的量浓度减小, Cl^- 增加, 水中 HCO_3^- 及 SO_4^{2-} 也相应发生沉淀, 使 Cl^- 富集, 即导致 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 系数下降。

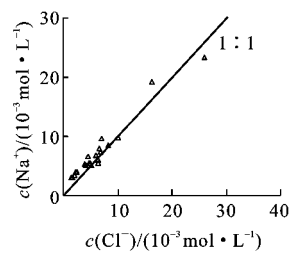


图 2 潜水中 $c(\text{Na}^+)$ 相对 $c(\text{Cl}^-)$ 的变化特征

Fig. 2 Change of $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ in Unconfined Aquifer

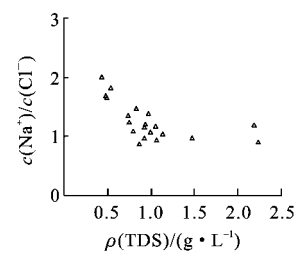


图 3 潜水中 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 相对 $\rho(\text{TDS})$ 的变化特征

Fig. 3 Change of $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ Versus $\rho(\text{TDS})$ in Unconfined Aquifer

3.4 Piper 三线图示法

研究区内水化学类型复杂多样, 笔者采用水文化学分析软件 AquaChem 4.0 软件中的 Piper 模块绘出沿地下水流方向水文化学类型图, 运用图解法分析研究区地下水水化学特征与演变规律, 揭示控制地下水质量演变的主要水化学过程^[10-11]。图 4~6 是根据开采、非开采潜水及承压水水化学数据所绘制的水化学类型 Piper 图。

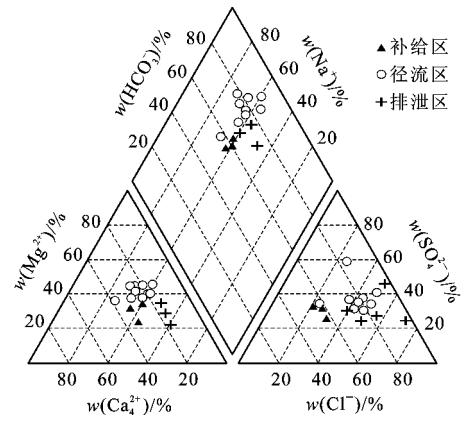


图 4 开采期潜水的化学类型

Fig. 4 Piper Diagram Showing Water Chemistry of Unconfined Aquifer During the Exploitation Period

由图 4~6 可以看出:

(1) 沿地下水流方向, 潜水水化学类型变化十分复杂, 主要从 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型过渡到 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Mg} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ 型。在补给区, 地下水径流条件好, 在含水层中的停留时间短, 水交替迅速, 含水层中易溶组分如 Cl^- 、

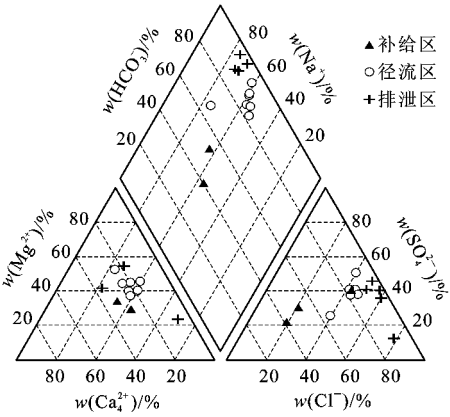


图 5 非开采期潜水的水化学类型

Fig. 5 Piper Diagram Showing Water Chemistry of Unconfined Aquifer During the Non-exploitation Period

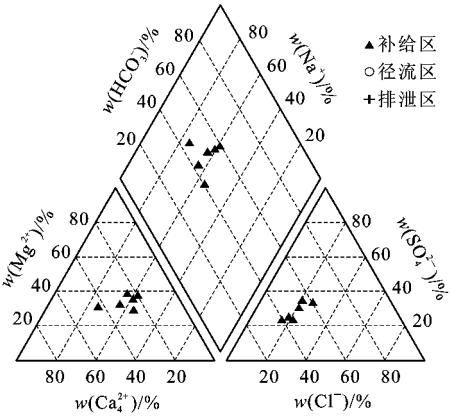


图 6 非开采期承压水的水化学类型

Fig. 6 Piper Diagram Showing Water Chemistry of Confined Aquifer During the Non-exploitation Period

SO_4^{2-} 等不断被淋滤并由地下径流带走, 阴离子以 HCO_3^- 占优势, 形成低矿化度的 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Na}^\circ\text{Mg}^\circ\text{Ca}$ 型地下水。径流区→排泄区过程中, 地下水不断与外界环境进行各种物理化学作用, 其中蒸发浓缩起主要作用。随着 pH 值和 TDS 含量的逐渐增加, 当 pH 值大于 7.4 和 TDS 大于 600 mg/L 时, 则产生碳酸盐的沉淀, 致使水中 HCO_3^- 离子浓度降低, 最终形成矿化度较高的 $\text{Cl}^\circ\text{SO}_4^\circ\text{HCO}_3-\text{Mg}^\circ\text{Na}^\circ\text{Cl}^\circ\text{SO}_4-\text{Na}^\circ\text{Mg}$ 等类型水。

(2)地下水水化学类型季节变化不明显, 其成分的形成和演变主要受流经岩(土)的种类和性质以及各种物理化学作用所控制。

(3)承压水水化学类型比较单一, 主要为低矿化度的 $\text{HCO}_3-\text{Na}^\circ\text{Mg}^\circ\text{Ca}$ 型为主。

4 结语

(1)季节变化对潜水和承压水水化学类型空间变异性影响较小。潜山水文化学性质空间变异性较承压水大, 主要受含水层介质、地形地貌、水文气象条件和人类活动等因素的影响大, 尤其 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 空间变异性较大, 是决定潜水盐化作用的主要变量, 承压水受外界因素干扰较少。

(2)腰坝绿洲为潜水子系统的径流、排泄区, 水文化学过程为溶滤、蒸发浓缩、阳离子交换和人为混合共同起作用。

(3)潜水子系统 TDS 较高, 水化学类型变化也较复杂, 主要从 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4^\circ\text{Cl}-\text{Na}^\circ\text{Mg}^\circ\text{Ca}$ 型向 $\text{Cl}^\circ\text{SO}_4^\circ\text{HCO}_3-\text{Mg}^\circ\text{Na}^\circ\text{Cl}^\circ\text{SO}_4-\text{Na}^\circ\text{Mg}$ 型演化。承压水水化学类型也比较单一, 主要为低矿化度的 $\text{HCO}_3-\text{Na}^\circ\text{Mg}^\circ\text{Ca}$ 型为主。

参考文献:

[1] 章光新, 邓 伟, 何 岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006 17(1): 20-28.

[2] 陈梦熊. 西北干旱区水资源的合理开发利用与荒漠化防治[J]. 地球科学与环境学报, 2005. 27(4): 1-7.

[3] 苑莲菊, 武胜忠. 干旱区地下水系统——贺兰山西侧地下水系统[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

[4] 沈照理, 朱婉华, 钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[5] 万利勤, 徐慧珍, 殷秀兰, 等. 济南岩溶地下水化学成分的形成[J]. 水文地质工程地质, 2008. 35(3): 61-64.

[6] 苏春利, 王焰新. 大同盆地孔隙地下水化学场的分带规律性研究[J]. 水文地质工程地质, 2008. 35(1): 83-89.

[7] 赵新锋, 陈建耀, 唐常源, 等. 珠江三角洲小流域地下水化学特征及演化规律[J]. 生态环境, 2007. 16(6): 1620-1626.

[8] 王水献, 王云智, 董新光. 焉耆盆地浅层地下水埋深与 TDS 时空变异及水化学的演化特征[J]. 灌溉排水学报, 2007. 26(5): 90-93.

[9] 侯景儒, 黄竟先. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[10] 孙亚乔, 钱 会, 张 黎, 等. 基于矩形图的天然水化学分类和水化学规律研究[J]. 地球科学与环境学报, 2007. 29(1): 75-79.

[11] 钱 会, 王晓娟, 李便琴. 地下水系统平衡化学模型的研究现状及发展方向[J]. 地球科学与环境学报, 2005. 27(1): 59-64.