

“三滩”傍河水源地地下水水位降落漏斗区水质演化

黎涛¹, 马腾¹, 李亮¹, 左鸣放²

(1. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 甘肃省地质环境监测院, 兰州 730050)

摘要: 本文在 1987~2006 年兰州断陷盆地典型水源地地下水环境监测资料基础上, 通过 2007 年 10 月环境地质补充调查采集地下水样品 11 组、地表水 1 组, 综合分析了断陷盆地地下水集中开采区浅层地下水水化学特征及时空分布规律, 以及黄河条带状为补给区的地下水与开采降落漏斗的水质演变关系。根据多年开采过程中地下水水化学成分的变化及影响因素, 阐明了水化学组分与地下水位的密切关系; 利用开采量水质时空变化对比资料, 得出地下水位下降排泄区与傍河区地下水存在的水力联系。依据本次环境地质调查结果和水样实测数据, 进一步论证了傍河区地下水受黄河激发补给因素控制的结论。

关键词: 地下水; 降落漏斗; 水化学场; 地球化学模拟

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)02-0010-06

自 20 世纪七、八十年代以来, 随着人类活动影响的不断加剧, 我国大部分地区特别是干旱与半干旱地区, 水循环规律和汇流条件发生了深刻的变化^[1]。为了查明地下水资源环境变化, 采取相应的保护措施, 以天然水化学特征及其形成机理、演化规律为研究目标的调查十分必要^[2]。

兰州市地处中国西北, 降雨稀少, 蒸发强烈, 多年平均蒸发量是降水量的 5 倍。有限的地下水资源成为干旱一半干旱地区制约经济发展的瓶颈。受特定的水文地质条件制约, 兰州地下水资源的分布在区域上具有不均匀的特点, 水质差异很大。兰州“三滩”水源地位于兰州断陷盆地内, 黄河两岸。南为七里河区的马滩及崔家大滩水源地, 北为安宁区的迎门滩水源地, 沿黄河两岸呈东西延伸的带状分布, 水源地面积约 15.84km², 始建于 1964 年, 从上世纪 80 年代初到 90 年代初开采量与开采面积不断增大, 漏斗逐渐形成; “三滩”水源地共有 68 眼水井, 其中马滩最深的水井达 420m, 主要开采井群深度在 120m 附近, 由于包气带地层和含水层的净化作用, 使其具有水质好、水量丰富的特点, 是兰州理想的地下“天然水库”。

因此, 研究兰州“三滩”水源地地下水多年水化学

特征及其变化条件, 探讨地下水环境的形成、演化规律和补给特征以及水资源开发利用过程对水环境的影响, 可为地下水资源可持续利用和保护提供科学依据。

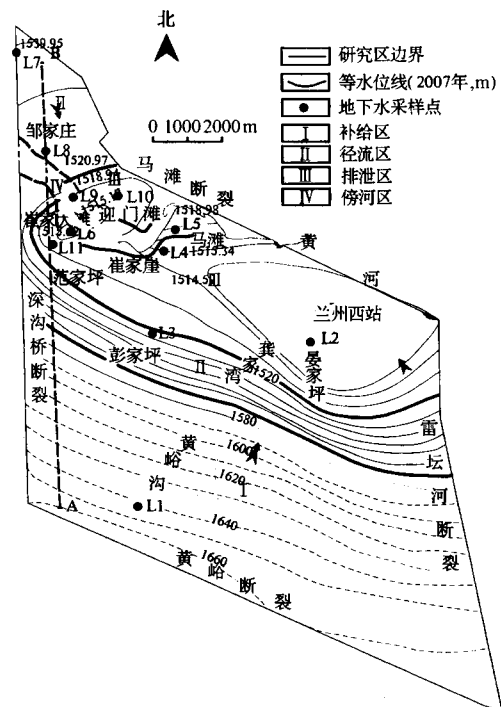


图 1 研究区略图

Fig. 1 Sketch map of the study area

收稿日期: 2009-04-22; 修订日期: 2009-11-01

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0773)

作者简介: 黎涛(1984-)男, 博士研究生, 主要从事地下水污染与防治研究。

E-mail: litaocug@gmail.com

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

兰州市地处黄土高原西部, 为典型的黄土地貌; 属

内陆半干旱气候区,多年平均降水量 317.6mm,对地下水补给有意义的有效降雨量为 187.9mm。黄河自西向东穿过研究区,与沿岸地下水水力联系紧密。区内黄河多年平均流量为 $1\ 064.41\text{m}^3/\text{s}$,最大流量为 $1320\text{m}^3/\text{s}$ (1955年),最小流量为 $681\text{m}^3/\text{s}$ (1969年)。近年来,由于兰州河口以上的黄河上游大中型水库的调蓄作用,黄河流量日趋稳定。

1.2 区域地质

1.2.1 构造

兰州断陷盆地四周均系构造断裂所切割,其中 NW 向的平行断裂(马滩断裂、黄峪断裂)是祁吕贺兰

山字形构造的一部分;SN 向的断裂(雷坛河断裂、深沟断裂)属于河西构造体系,两者共同切割形成北西向菱形断陷盆地,主要出露地层为新生界地层。

1.2.2 地层

兰州断陷盆地的基底以新近系砂岩、泥岩组成,分布于盆地内的下更新统范家坪组地层,为浅层地下水的主要储水地层;在河谷地区 III ~ VI 级河谷阶地主要是一套巨厚层的黄土沉积,为中 ~ 上更新统亚砂土及砂砾石层堆积;黄河沿岸 I、II 级河谷阶地及漫滩的亚砂土及砂砾石全新统地层,是构成兰州市区主要的蓄水构造地层。

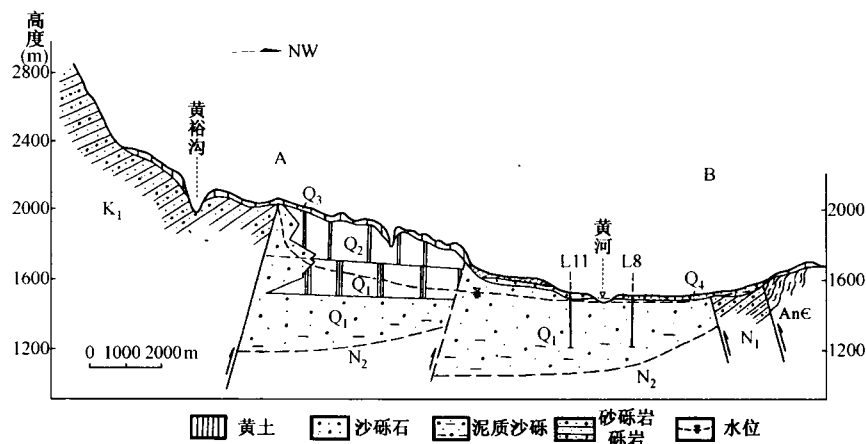


图2 兰州断陷盆地孔隙水系统剖面示意图

Fig. 2 Schematic profile showing the unconsolidated sediment aquifer system in the Lanzhou faulted-depression basin

1.3 区域水文地质

研究区地下水补给主要来源于黄河水入渗补给,傍河区地下水位低于黄河水面 11 ~ 13m,黄河由上游区排泄地下水转化成在该区对地下水的补给;黄河在该区长 9km,平均水面宽度 500m,地下水位普遍低于河水。因而在傍河地段接受黄河水补给、地下水资源丰富,水质较好,具有良好的开采利用价值^[4]。

1.3.1 含水层特性

黄河横贯断陷盆地中部,补给量充足,松散层厚度大,富水性强,为地下水的补给提供了良好的条件。富水性极强的含水层主要在断陷盆地沿河地带的“三滩”水源地,单井涌水量在 $3\ 000\text{m}^3/\text{d}$ 以上;富水性较强的含水层主要部分在黄河漫滩和 I、II 级阶地内,单井涌水量在 $500 \sim 3\ 000\text{m}^3/\text{d}$ 。上述区域内的松散岩层构成了研究区内的主要含水层。

1.3.2 地下水径流

在开采初期断陷盆地内地下水分别由两岸向黄河方向径流,水力坡度变化在 $2.1\% \sim 5.6\%$ 之间,地下

水与黄河水的补排关系随河水位年内和年际变化而变化,黄河水位较低时,地下水向黄河排泄;而黄河水位较高时则向地下水补给。随着地下水开采的加剧,地下水水位下降,黄河南北两岸分别形成了以马滩和迎门滩为中心的降落漏斗,地下水从不同方向向降落漏斗中心汇流,水力坡度变化在 $2.5\% \sim 8.5\%$ 之间。黄河逐渐由原来的排泄区演变成补给区,开采成为水源地地下水的主要排泄途径。近期由于开采量逐渐减少,区域地下水位回升,降落漏斗面积和深度逐渐减小,马滩、迎门滩水力坡度变化大多在 $2.1\% \sim 6.5\%$ 左右,地下水由开采型转变为向黄河排泄。

2 样品采集与分析

2.1 采样点布置原则与目的

为分析兰州“三滩”水源地地下水的水化学分布规律,2007年11月在研究区分别选取断陷盆地内补给—径流—排泄—傍河处原有的地下水监测点作为地下水采样点,进行了实际调查取样分析,共采集地下水

表 1 兰州断陷盆地孔隙地下水水化学指标统计结果表

Table 1 Statistics of hydrochemical data of the groundwater in the Lanzhou faulted - depression basin

年份	编号	水温(℃)	pH	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
				(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
2007	L-1	12.2	7.16	379.86	3.52	54.17	103.80	40.28	159.37	152.58	267.73
	L-2	17.8	7.37	320.98	3.80	77.75	57.66	64.88	153.81	145.95	365.74
	L-3	13.8	7.84	4857.26	19.10	803.20	166.60	338.90	1536.20	2078.30	170.09
	L-4	13.1	7.60	191.58	3.98	38.43	23.51	18.39	123.16	30.25	92.29
	L-5	15.2	7.48	54.96	9.27	26.87	82.71	31.78	33.57	76.70	411.88
	L-6	13.8	7.32	183.93	2.99	24.82	75.52	25.94	44.41	113.22	205.94
	L-7	10.8	8.36	346.15	3.68	250.90	7.15	15.89	87.17	207.51	452.31
	L-8	11.0	7.05	448.86	4.07	68.14	101.60	41.39	160.63	205.75	265.44
	L-9	11.2	7.47	204.77	2.64	18.26	81.25	29.36	95.24	84.42	212.81
	L-10	12.4	7.10	485.35	5.21	77.84	126.60	86.75	129.28	264.47	409.60
2006	L11-1	13.8	7.06	1373.45	5.57	70.15	205.68	116.78	385.89	690.82	202.89
	L-4	-	8.07	221.2	4.6	64.0	23.0	16.4	120.5	33.6	81.8
2005	L-6	-	7.87	394.9	4.6	74.0	63.1	28.6	70.2	220.9	133.0
	L-4	-	7.2	250.5	5.5	62.4	26.1	17.0	128.3	43.2	64.1
2004	L-6	-	7.9	234.1	3.5	46.0	62.1	46.1	46.1	124.9	189.2
	L-4	-	7.8	266.3	3.0	66.1	27.9	16.5	125.5	53.7	52.8
2001	L-6	-	8.2	363.9	2.5	63.0	84.2	24.4	68.1	206.2	169.1
	L-4	-	8.0	318.6	3.2	45.4	34.1	28.2	160.2	74.9	54.9
1997	L-6	-	8.0	108.1	1.8	18.5	69.3	18.0	41.8	62.4	207.5
	L-4	-	7.8	418.7	3.8	55.0	60.1	40.1	178.0	117.7	72.0
1990	L-6	-	8.1	169.4	3.3	13.6	87.2	21.9	64.5	73.5	189.2
	L-4	-	7.6	1587.2	5.8	221.0	268.5	113.1	751.5	317.0	179.4
1987	L-6	-	7.9	210.8	3.0	61.2	59.7	23.3	48.9	117.2	205.0
	L-4	-	7.7	191.6	4.0	38.4	23.5	18.4	123.2	30.2	92.3
	L-6	-	7.5	184.4	3.0	24.8	75.7	26.3	44.4	113.2	206.0

样 11 组(表 1),黄河地表水样 1 组,利用 DX-120 型离子色谱仪和 IRIS INTRE II XSP 型 ICP-AES 分别对阴、阳离子进行测定。并结合 1987~2006 年相同采样点浅层地下水水质监测数据,以此为基础研究黄河地表水对傍河区浅层地下水的离子来源的影响。

2.2 地下水水化学特征

兰州“三滩”水源地地下水的补给具有多源性,即黄河诱导补给、农灌回渗补给、大气降水补给、二类边界侧向补给、渠系入渗补给等,李俊亭等人通过分析计算得出傍河区黄河水补给地下水比例 90%~96%^[5],杨顾等人利用同位素计算黄河河水在沿河区和远河区组成比例分别为 99.38%、85.66%^[6]。可以看出黄河诱导补给在傍河区占优势。

根据水样测试分析,得出:黄河水阳离子以 Ca²⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主。傍河区地下水在黄河的稀释淡化作用下,由排泄区溶解性总固体较高的 Cl-Na 型水向傍河区溶解性总固体较低的 HCO₃-Ca 型水过渡,黄河对地下水的影响主要为稀释淡化作用。排泄区地下水水质受黄河影响较小。

“三滩”水源地地下水在开采条件下,由于黄河水

对地下水的强烈补给,形成傍河区地下水水文化学分带复杂多变。

黄河以南山区,地势较高,年降水量在 400mm 左右,是地下水补给区,地下水水质较好,为 HCO₃-Ca 或 HCO₃-Ca·Mg 型水, TDS < 0.5g/L;断陷盆地中部为排泄区地下水宏量组分的含量呈逐渐上升趋势,在傍河区高 TDS 的地下水与黄河侧渗补给的地下水相混合,致使这一地区的地下水水化学类型有 HCO₃-Ca、HCO₃-Ca·Mg 或 Cl·SO₄-Na·Ca·Mg 及 Cl-Na 型水。水质类型差异较大, TDS 在 0.5g/L 左右,最高可达 16.1g/L,形成一个复杂的水化学带。

黄河以北研究区内,由于降水量小,蒸发浓缩作用强烈,地下水的 TDS 较高,以 Cl·SO₄-Na 或 Cl-Na 型水为主。北部傍河区,地下水经过长距离的径流后形成的高矿化水与黄河侧渗补给的地下水相混合,致使这一带地下水水化学条件变得非常复杂。

“三滩”水源地在开采条件下,近河地带地下水与地表水积极交替,水质被淡化, TDS 普遍小于 1g/L,为 HCO₃-Ca 型水。黄河水对地下水的淡化作用是形成以黄河水体为对称轴的水文化分带的根本原因。

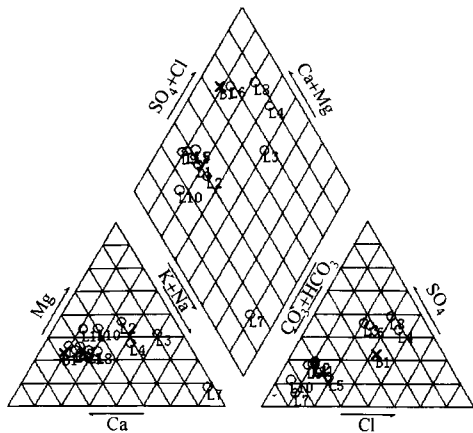


图 3 水源地地下水水化学三线图

Fig. 3 Trilinear diagram of groundwater samples in the wellfield

3 地下水水质演化

3.1 降落漏斗区水位与水质变化

开采“三滩”水源地地下水引起黄河水对地下水的诱导补给,这种诱导补给模式影响了“三滩”水源地的流场,黄河水位和水质制约着“三滩”水源地地下水水位与水质。“三滩”水源地自 20 世纪 60 年代大规模开采以来,至 1990 年达到 7442.6m³/a。之后,因水质恶化开采量下降,到 1997 年时开采量 3 023.4m³/a。随着开采量不断减少,排泄区地下水降落漏斗恢复,地下水水质指标 TDS 总体呈现下降;由于黄河激发补给量减少,稀释作用减弱,傍河区地下水 TDS 浓度有微弱抬升,至 2006 年傍河区地下水 TDS 浓度上升到 823.90mg/L。

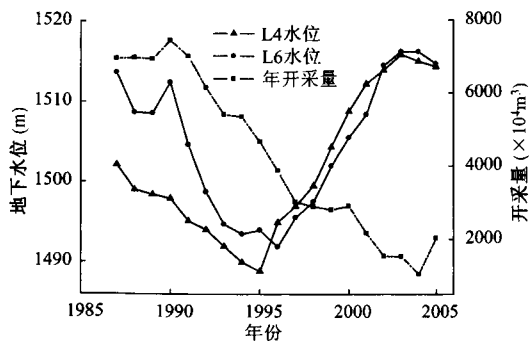


图 4 “三滩”水源地开采量与水位关系图

Fig. 4 Relationship between withdrawal and water level of the Santan wellfield

从排泄区采样点 L4 地下水阴、阳离子变化趋势图(图 5、6)中可以看出阴、阳离子随开采量减少而降低。因该点位于地下水降落漏斗中心地区,在地下水超采

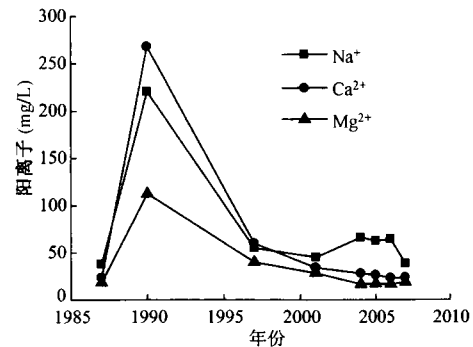


图 5 “三滩”水源地地下水 (L4) 阳离子变化趋势图

Fig. 5 Change in cation concentrations (L4) in the Santan wellfield

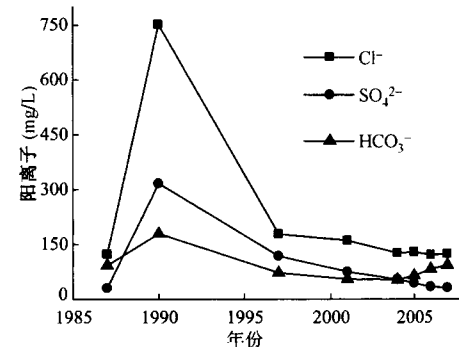


图 6 “三滩”水源地地下水 (L4) 阴离子变化趋势图

Fig. 6 Change in anion concentrations (L4) in the Santan wellfield

时期,是黄河激发补给与地下水补给的汇区,也是地下水与地表水混合锋面所在位置。黄河水 HCO₃⁻ 为 190 ~ 250mg/L 之间, Ca²⁺ 为 50 ~ 70mg/L 之间,排泄区 HCO₃⁻、Ca²⁺ 含量较低,说明在地下水降落漏斗区地下水不仅存在混合作用,还存在溶滤和离子交换作用;降落漏斗区水位上升后,激发补给作用减弱,Na⁺ 有缓慢抬升,地下水-地表水混合锋面已向河边推进。

L6 采样点位于傍河区,距离黄河不足 100m,与黄河水力联系紧密。从阴阳离子变化趋势图(图 7、图 8)中可以看出, Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 是水中的优势阳离子和优势阴离子。在 2000 年以前开采量较大,黄河激发补给对傍河区地下水稀释作用明显, Na⁺ 含量呈下降趋势;2000 年以后地下水水位抬升,黄河水对傍河区地下水激发补给作用减弱。补给它的排泄区地下水属 SO₄-Ca 型水, SO₄²⁻ 含量不断增高,傍河区地下水受区域地下水水质的影响增大, SO₄²⁻ 含量逐渐上升。

3.2 地下水水质成因

利用水中 Cl⁻ 不易与其他阴离子交换、性质稳定的特点,模拟选取 Cl⁻ 作为指示剂,在没有人污染干

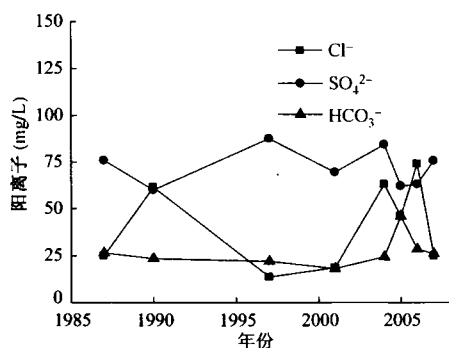


图 7 “三滩”水源地地下水(L6)阳离子变化趋势图
Fig.7 Change in cation concentrations (L6) in the Santan wellfield

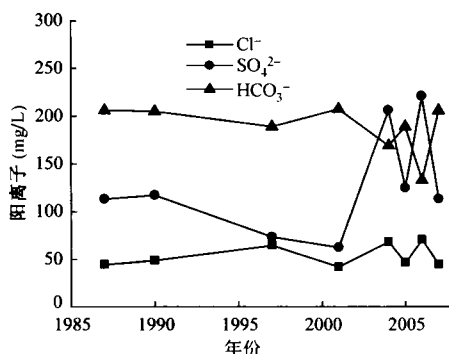


图 8 “三滩”水源地地下水(L6)阴离子变化趋势图
Fig.8 Change in anion concentrations (L6) in the Santan wellfield

扰的情况下可以定量指示混合比例,得出该区水岩相互作用及黄河水占该处地下水的比例关系,这其中包括黄河水对地下水补给和驱替。以崔家大滩水源地为典型区,从水动力场和水化学场角度分析,L11-1 采样点地下水受黄河激发补给较小,将其作为基本不受黄河影响的排泄区地下水与黄河水混合,得出傍河区地下水中黄河水所占比例。

表 2 崔家大滩水样混合模拟结果

Table 2 Mixed simulation result of groundwater

	samples in the Cuijiadatan (mg/L)						
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
L11-1	5.5692	70.15	205.68	116.78	385.89	202.89	690.82
B3	2.0198	14.64	65.44	19.38	22.82	223.49	61.41
L6	2.9921	24.82	75.52	25.94	44.41	205.94	113.18
模拟浓度	2.2331	17.94	73.80	25.18	44.45	220.45	98.88

水样选取常量元素 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻ 进行模拟,结果见表 2。模拟结果显示黄河水占崔家大滩傍河区采样点地下水总量的 94.00%。通过区内的灰岩、白云岩、盐岩和石膏分布

情况分析,这类岩层均是沉积系统含水层中的主要易溶岩,采用 Cl⁻ - Na⁺ 浓度关系图与 SO₄²⁻ - Ca²⁺ 浓度关系图,判断模拟值与实测值偏差的原因。通过图 9、10 分析看出,崔家大滩实际混合水样 L6 的 Na⁺ 浓度高于模拟值,这说明 L6 不是 L11-1 和黄河水直接混合的结果。

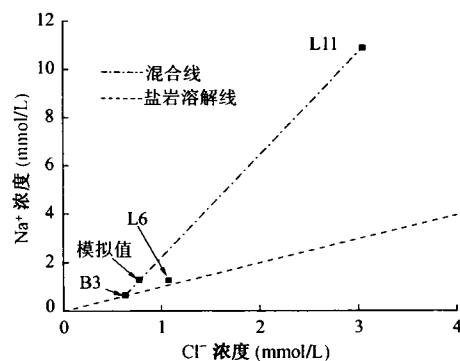


图 9 崔家大滩混合模拟 Cl⁻ - Na⁺ 浓度关系图
Fig.9 Mixed simulation of the relationship between Cl⁻ concentrations and Na⁺ concentrations

计算数据表明,该区地下水与含水层介质有阳离子交换作用存在,其中富余的 Na⁺ 是其他阳离子从含水介质中置换出来的,而 Ca²⁺ 浓度与 SO₄²⁻ 模拟结果基本符合;L6 实测 SO₄²⁻ 略高于模拟值,通过模拟结果中硫酸盐饱和指数 SI 全部为负值可以推断,可能有少许 SO₄²⁻ 从含水介质中进入地下水。

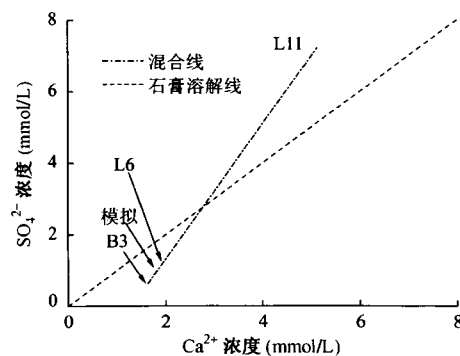


图 10 崔家大滩混合模拟 SO₄²⁻ - Ca²⁺ 浓度关系图
Fig.10 Mixed simulation of the relationship between SO₄²⁻ concentrations and Ca²⁺ concentrations

4 结论

研究区地下水由山前补给区至黄河两岸沿地下水流向,其优势阴离子组分的区域演化模式为: HCO₃⁻ + SO₄²⁻ - SO₄²⁻ + HCO₃⁻ - SO₄²⁻ + Cl⁻ - Cl⁻ + SO₄²⁻ - Cl⁻ - HCO₃⁻。以黄河为中心对称水化学分带。影响和决

定该地区水化学特征的主要因素有:地下水补给水源的水化学成分、离子交换作用和混合作用、地下水蒸发浓缩作用。由于黄河激发补给量减少,稀释作用减弱,地下水 TDS 总体呈下降趋势,傍河区地下水 TDS 浓度有微弱抬升;由于混合锋面向黄河推进,排泄区浅层地下水水化学指标逐渐向正常演化方向发展。傍河区浅层地下水主要受黄河激发补给因素控制,在维持目前开采条件下,水化学指标向开采初期方向发展。

参考文献:

- [1] 翁文斌,王忠静,赵建世. 现代水资源规划—理论、方法和技术[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [2] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [3] 韩再生. 傍河地下水水源地的几个问题[C]//第30届国际地质大会论文集(第22卷). 北京:地质出版社,1998:13-16.
- [4] 左鸣放. 兰州市后备战略水源地勘查报告[R]. 兰州:甘肃省地质环境监测院,2006.
- [5] 李俊亭,王文科. 西北地区五城市大型水源地下水水流模型若干问题研究[J]. 西安地质学院学报,1994,16(2):61-69.
- [6] 杨顾. 兰州市傍河水源地地下水资源及污染研究报告[R]. 兰州:甘肃省第一水文地质工程地质队,1991.
- [7] 王晓娟. 银川平原地下水化学成分演化规律及其形成机制研究[D]. 西安:长安大学,2005.
- [8] 李文鹏,郝爱兵. 中国西北内陆干旱盆地地下水形成演化模式及其意义[J]. 水文地质工程地质,1999,26(4):28-32.
- [9] B J Merkel. 地下水地球化学模拟的原理及应用[M]. 朱义年,王焰新,译. 武汉:中国地质大学出版社,2005.

An analysis of groundwater quality evolution in the area of depression cone in the Santan riverside wellfield

LI Tao¹, MA Teng¹, LI Liang¹, ZUO Ming-fang²

(1. Biogeology and Environmental Geology Laboratory of Ministry of Education, Wuhan 430074, China;
2. Gansu Institute of Geo-Environmental Monitoring, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The hydrochemical characteristics and the spatial and temporal distribution of water chemistry in the shallow groundwater in the Lanzhou faulted-depression basin were examined in this paper. The study focused on the exploitation of groundwater in shallow groundwater areas and analyzed the relationship of the Yellow River for groundwater recharge and water quality of the exploitation of the evolution of the land funnel. A typical rift basin water monitoring data for many years (1987-2006) of groundwater a recent investigation of the geological environment and groundwater was used and the surface water sampling test results were included. Based on the chemical compositions of water samples and the impact factors of multi-year exploitation of groundwater, the chemical compositions of water was found to be closely related to the water table. Comparison of spatial and temporal changes in the exploitation with water quality data and analysis of groundwater level decline in discharge areas along the riverside area conform the existence of a hydraulic connection. Based on a geological environment survey and analyses of water samples, this research further came to the conclusions that the riverside wellfield is controlled by the induced recharge from the Yellow River.

Key words: groundwater; depression cone; hydrochemical field; geochemical simulation

责任编辑:张若琳