

太原市深层孔隙水的水化学分带性及其地球化学模拟

郭青海, 阎世龙, 蒋方媛

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 太原市深层孔隙水具有明显的水化学分带性, 具体表现为由山前到盆地依次分布硫酸—重碳酸型水、重碳酸—硫酸型水、重碳酸型水, 且各类地下水均大体在南北向上呈条带状展布, 这与补给水的水化学状况密切相关。利用地球化学模拟软件 PHREEQC 建立一系列地下水混合模型对深层孔隙水的水化学形成过程进行模拟, 结果显示: 盆地北部的深层孔隙水受到北部边山岩溶水、盆地北部浅层孔隙水、汾河水的补给, 其中北部边山岩溶水是最主要的补给源; 盆地西部的深层孔隙水由西部边山岩溶水与盆地西部浅层孔隙水混合而成; 盆地南部的深层孔隙水则由盆地北部与西部的深层水混合而成。混合作用是控制区域水化学状况的最重要的因素。

关键词: 太原市; 深层孔隙水; 水化学分带性; 地球化学模拟; 混合作用。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2005)02-0245-06

收稿日期: 2004-07-15

Hydrochemical Zonality and Geochemical Modeling of Deep-Lying Pore Water in Taiyuan City

GUO Qing-hai, YAN Shi-long, JIANG Fang-yuan

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

Abstract: Hydrochemical zonality was delineated for deep-lying pore water in Taiyuan. $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ water, $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ water and HCO_3 water occur sequentially from mountain area to basin area, in north to south zonal distribution, which is highly correlative with the hydrochemistry of supply water. To understand the forming process of deep-lying pore water hydrochemistry at Taiyuan, a series of groundwater mixing models were set up using PHREEQC. The results indicate that the deep pore water of the northern basin is recharged by karst water from the northern mountain area, shallow pore water from the northern basin, and Fenhe River water. Karst water from the northern mountain area is the most important source of recharge. Deep pore water in the western basin is recharged by karst water from the western mountain area and shallow pore water from the western basin. Hydrochemistry of deep pore water in the southern basin is affected by the mixing of deep pore water from the western basin with that from the northern basin. According to above analysis, the mixing process is the most important in forming the hydrochemistry of deep pore water at Taiyuan.

Key words: Taiyuan; deep-lying pore water; hydrochemical zonality; geochemical modeling; mixing process.

分带性是自然界的普遍规律, 如植被分布、地貌形态、气候特征、水资源量及大气降水量变化等, 常在地域上呈现明显的分带现象 (Guillen and Palanques, 1997; Sarkar and Guha, 1997; Mallik *et al.*, 2001). 在各类地质现象中, 分带性更为常见,

地质构造、岩浆活动乃至矿床、风化壳、地球化学元素等地质因素的分布规律时常体现出分带特点 (Naito *et al.*, 1995; Robion *et al.*, 1997; Wogelius *et al.*, 1997). 地下水的水文地球化学特征作为地下水系统的重要属性, 其空间变化也往往表现出

极强的分带性. 太原市深层孔隙水的水化学特征受地形地貌、地层岩性、地质构造以及水文气象等多种因素的影响, 由边山向盆地中心呈现水平分带性, 便是一个极好的实例.

太原市为华北能源重工业城市, 地下水在工农业生产与城市生活供水方面起着举足轻重的作用. 区内各类型地下水均有分布, 总体上山区以岩溶水与裂隙水为主, 盆地区以孔隙水为主. 限于篇幅, 本文仅研究区内深层孔隙水(含水层埋藏深度在 50~200 m 之间)的水文地球化学特征及其水化学分带现象, 并对深层孔隙水水化学组分的形成过程进行地球化学模拟.

1 区域水文地质条件

太原市地处晋中断陷盆地北端, 北、东、西三面环山, 地形北高南低. 盆地东部与西部分别属太行山系和吕梁山系, 北部则为棋子山, 标高 1 300~1 780 m. 汾河自兰村峡谷进入盆地后向南形成较为开阔的冲积平原, 标高 771~810 m. 整体地形从山区向盆地呈阶梯状下降, 但两侧不对称, 该地形特征对地下水径流具有明显的控制作用(图 1).

研究区内的前第四纪地层主要出露于盆地两侧及北部的山区地带. 寒武系、奥陶系出露于山西汾河河谷, 并广泛分布于东西山的北部; 石炭系则分布于东西山区的中北部及西边山地带; 二叠系零星出露于东山与晋祠西北山区.

区内广泛分布第四纪地层, 成因类型俱全. 下更新统(Q_1)自丘陵区至冲积平原大面积分布, 为一套河湖相杂色粘土亚粘土, 含砾石及泥灰岩地层; 中更新统(Q_2)分布也极广泛, 在丘陵区为黄土状土(Q_2^{col}), 盆地区为冲积物(Q_2^{al})和洪积物(Q_2^{pl}); 上更新统(Q_3)广泛分布于丘陵、平原区, 丘陵区以亚砂土为主, 山前地带为洪积黄土, 汾河两侧为冲积型砂砾卵石及亚砂土, 南部为砂、亚砂及亚粘土; 全新统(Q_4)分布于盆地边缘及河床地带, 由砂砾、砂、亚砂土及少量亚粘土组成地表岩性分布, 多具双层或多层结构.

松散岩类分布面积广、厚度大、孔隙发育, 形成了良好的天然储水构造, 含水层受外围山区岩溶裂隙水的侧向补给以及大气降水与汾河的渗漏补给, 水量非常丰富, 其主要排泄形式为人工开采及沿地下径流排泄于下游地区. 按照含水层埋藏深度的差

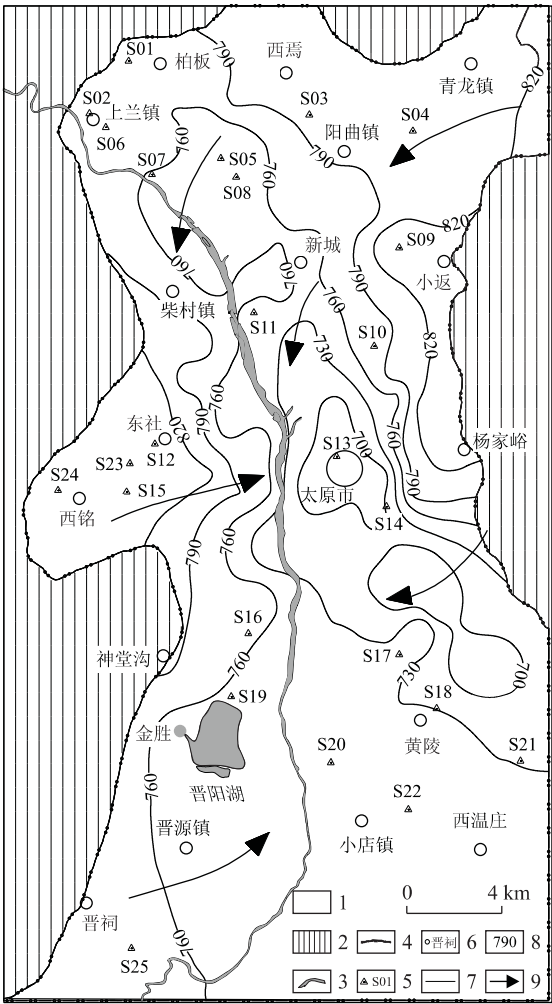


图 1 研究区略图及采样点位置

Fig. 1 Simplified map of the study area with location of water samples

1. 盆地区; 2. 山区; 3. 河流与湖泊; 4. 盆地边界; 5. 水样点; 6. 城镇; 7. 等水位线; 8. 水位标注(m); 9. 地下水流向

异, 可将区内的松散岩类孔隙水分为浅层孔隙水与深层孔隙水. 其中浅层孔隙水埋深小于 50 m, 而深层孔隙水埋深在 50~200 m 之间, 是本次研究的主要对象.

2 深层孔隙水的水化学特征及其空间分带性

研究采用的深层孔隙水水样共 25 件, 均采集于 2002 年 5 月. 采样点位置与水化学分析结果分别见图 1 与表 1. 由表 1 可知, 各水样的 pH 值介于 7.1~7.8 之间, 为中性—略偏碱性水. 地下水中的主要阴离子为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} , 主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,

表 1 深层孔隙水水化学特征

Table 1 Hydrogeochemistry of deep-lying pore water

mg/L(pH 值除外)

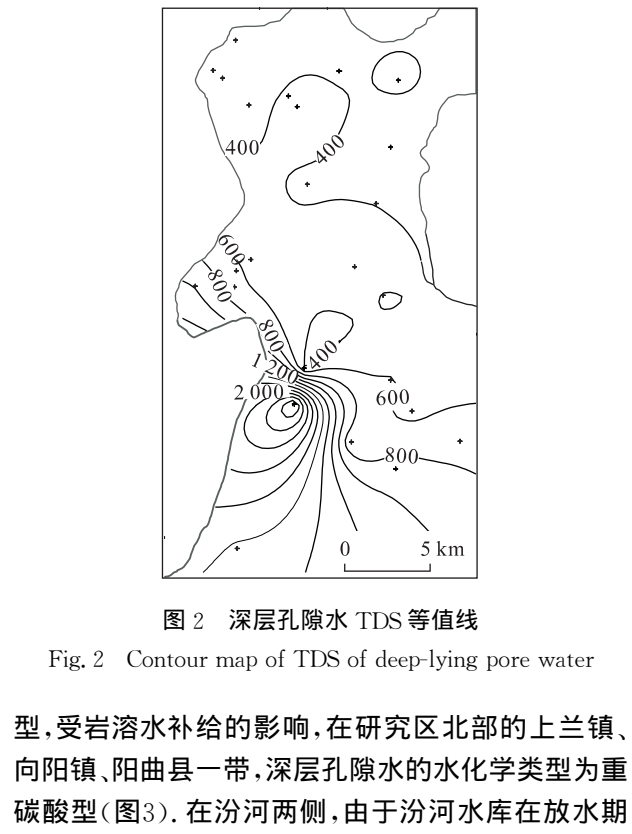
水样编号	水样位置	pH 值	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻	游离 CO ₂	TDS
S01	镇城	7.6	57.1	21.3	1.00	11.0	14.2	3.8	259.0	20.0	0.040	0.40	2.2	258.3
S02	上兰造纸厂	7.6	53.1	21.9	1.00	13.0	12.4	8.2	272.0	12.0	0.024	0.40	1.1	258.0
S03	陈家窑	7.8	56.1	22.5	1.10	46.8	53.2	56.2	262.0	1.0	0.048	0.36	0.0	368.3
S04	阳曲大队	7.6	47.1	26.1	1.15	89.2	35.4	64.8	342.0	1.0	0.072	0.60	3.3	436.4
S05	向阳店	7.7	60.1	44.4	0.90	47.8	37.2	31.2	400.0	10.0	0.016	0.42	2.2	432.0
S06	上兰村东口	7.5	54.1	23.7	1.02	13.5	14.2	2.4	272.0	10.0	0.112	0.40	4.4	255.4
S07	太钢水源地	7.4	63.1	25.5	1.06	13.8	19.5	14.4	287.0	15.0	0.008	0.26	2.2	296.1
S08	北下温村	7.4	63.1	57.2	1.90	56.8	51.4	126.0	372.0	1.0	0.004	0.44	11.0	543.8
S09	后沟供电局	7.7	56.1	21.9	0.90	10.0	10.6	8.6	268.0	10.0	0.016	0.34	2.2	252.5
S10	太钢一中	7.5	49.1	21.9	0.88	62.2	30.1	76.8	238.0	35.0	0.016	0.46	1.1	395.5
S11	新村	7.8	63.1	33.4	1.18	27.2	28.4	55.2	336.0	2.0	0.004	0.40	0.0	378.9
S12	东社	7.8	83.2	31.0	0.95	41.8	42.5	149.0	220.0	15.0	0.080	0.80	0.0	474.3
S13	省委大院	7.5	65.1	34.0	1.42	93.8	56.7	141.0	308.0	33.0	0.024	0.96	3.3	580.0
S14	太铁公寓	7.4	81.2	32.2	1.24	15.5	14.2	96.1	281.0	10.0	0.032	0.44	5.5	391.4
S15	西山机修厂	7.7	147.0	32.8	0.95	31.5	58.5	267.0	253.0	1.0	0.040	0.40	0.0	665.7
S16	南屯化工厂	7.8	68.1	21.9	0.98	45.0	31.9	57.6	326.0	1.0	0.004	0.30	2.2	389.8
S17	许坦	7.7	56.1	22.5	1.40	148.0	119.0	132.0	272.0	1.0	0.040	0.42	2.2	616.5
S18	黄陵	7.8	56.1	32.8	1.00	94.5	67.4	108.0	311.0	38.0	0.016	1.16	0.0	554.5
S19	武家庄	7.1	468.0	241.0	1.32	144.0	840.0	941.0	421.0	1.0	0.004	0.50	25.3	2 847.3
S20	加节粉房	7.5	68.1	49.9	1.32	87.0	63.8	84.1	510.0	2.0	0.004	0.82	6.6	612.0
S21	武宿	7.8	37.1	26.1	1.05	208.0	151.0	156.0	302.0	1.0	0.016	1.40	0.0	732.7
S22	南黑窑	7.7	55.1	53.5	1.00	214.0	238.0	199.0	305.0	2.0	0.004	0.90	2.2	916.0
S23	下庄	7.7	121.0	46.2	0.90	28.8	26.6	257.0	256.0	60.0	0.080	0.40	4.4	669.0
S24	太原水泥厂	7.5	184.0	54.7	1.00	44.0	72.7	432.0	268.0	70.0	0.024	0.44	1.1	992.9
S25	东庄	7.6	348.0	49.2	2.00	66.8	12.4	917.0	299.0	1.0	16.000	4.60	1.1	1 566.5

部分水样的 Cl⁻ 与 Na⁺ 含量也很高. 水样的 TDS 值变化非常大, 最小值(S09)为 252. 2 mg/L, 最大值(S19)达 2 847. 3 mg/L, 这表明研究区深层孔隙水的水化学特征差异较大.

由研究区深层孔隙水的 TDS 等值线图(图 2)可知, 盆地北部孔隙水的 TDS 一般小于 0. 5 g/L, 向南逐渐变大, 在盆地西南部已大于 1 g/L, 局部地区高达 2. 8 g/L. 地下水的 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺ 等离子的浓度(图略)也表现出与 TDS 相似的空间分布特征, 在区内均由北向南渐渐升高. 此外, 深层孔隙水中 Cl⁻、Mg²⁺、Na⁺ 等离子浓度的变化趋势也与 TDS 的变化呈现出很强的一致性(图略).

边山的岩溶裂隙水在运移过程中侧向补给盆地孔隙水, 致使盆地内的地下水水化学类型在补给区水化学类型的基础上, 随着地形、地貌以及水文地质条件的变化, 呈现有规律的水平分带, 从山前到盆地依次有硫酸—重碳酸型、重碳酸—硫酸型、重碳酸型等水化学类型(图 3).

在盆地的北部山区及东西山北部, 碳酸盐岩大面积出露, 岩溶水水化学类型为 HCO₃—Ca·Mg



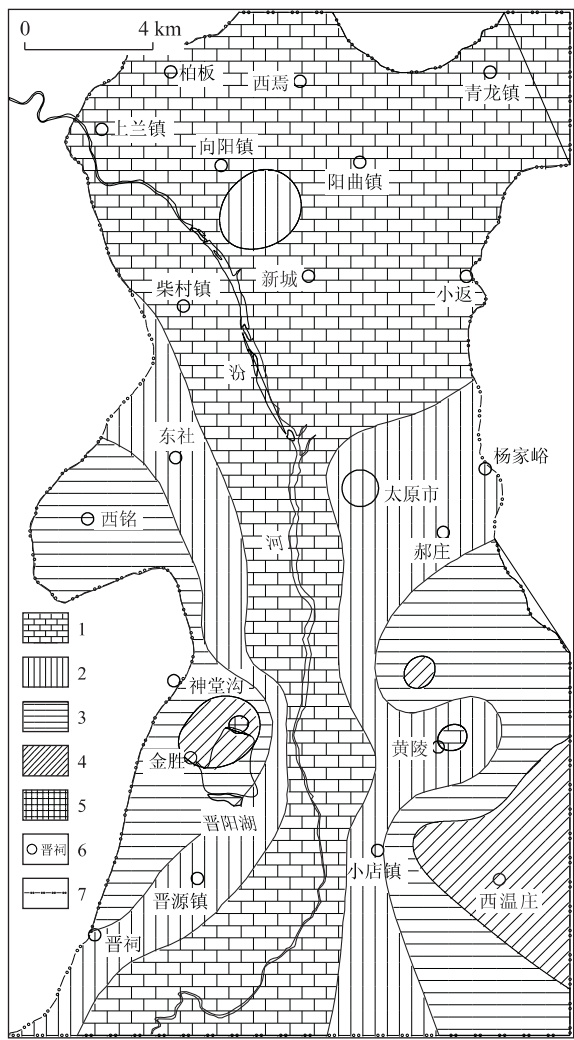


图 3 水化学类型分区

Fig. 3 Zoning map of pore water hydrochemistry
1. 重碳酸型水; 2. 重碳酸硫酸型水; 3. 硫酸重碳酸型水; 4. 重碳酸硫酸氯化物型水; 5. 硫酸氯化物型水; 6. 城镇; 7. 盆地边界

的大量渗透补给,地下水水质被淡化,致使重碳酸型水沿汾河两侧呈条带状展布(图 3)。但沿汾河由南向北选取水化学类型为重碳酸型的地下水水样,做各主要离子浓度变化曲线。结果显示:地下水的 TDS 与 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 等离子含量大都呈现增加趋势(图 4)。

东西山中部岩性变为碎屑岩类,在煤系地层中含硫矿物的溶解作用下,加以矿坑排水及其他人类活动的影响,边山岩溶裂隙水的水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型与 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型。因而在盆地东西两侧的山前一带,深层孔隙水受岩溶裂隙水补给,水化学类型为硫酸—重碳酸型,向盆地中心则逐渐过渡为重碳酸—硫酸型(图 3)。

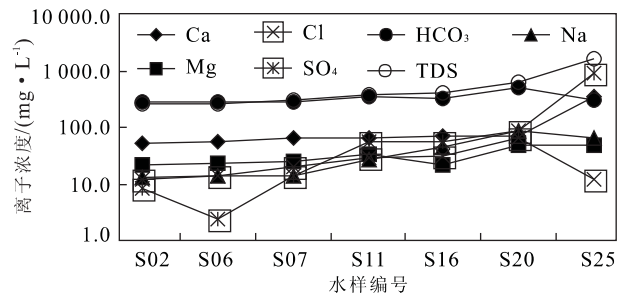


图 4 重碳酸型水离子深度变化曲线
Fig. 4 Variation of major ion contents of the HCO_3 water

重碳酸—硫酸—氯化物型水只在晋阳湖与盆地东南侧的西温庄一带有小块分布(图 3),这与该区是农业生产与生活区,地下水水质受人类活动影响比较大有关。晋阳湖北侧还有一小块劣质水区域,其水化学类型为硫酸—氯化物型(图 3)。这种劣质水的形成除与该区地下水径流缓慢、蒸发浓缩作用较强有关外,人类向晋阳湖中排污,以致地下水水质恶化,也是一个重要的因素。

3 深层孔隙水水化学组成的地球化学模拟

前面的分析表明:研究区深层孔隙水的水化学类型及其分带性主要受补给源地下水水质的控制。为深刻认识深层孔隙水水化学特征的形成过程,笔者利用地球化学模拟软件 PHREEQC 来建立一系列地下水混合模型,进而对不同区域的深层孔隙水的形成原因进行分析。在对比不同来源补给水混合结果与深层孔隙水的水化学特征时,笔者采用硬石膏、文石、方解石、白云石、石膏 5 种矿物的饱和指数为对比指标,这是由于在地下水由山区向盆地的径流及混合过程中,碳酸盐矿物与硫酸盐矿物的溶解和沉淀是最重要的水文地球化学过程之一。建模所用的北部山区岩溶水、西部山区岩溶水、盆地北部浅层孔隙水、盆地西部浅层孔隙水及汾河水的水化学组成资料分别采用各区所采集水样的平均值(水样均采集于 2002 年 5 月),详见表 2 所示。

对盆地北部的重碳酸型深层孔隙水(水样为 S1—S11)而言,北部山区的岩溶水及汾河渗漏水是它的 2 个可能来源,此外,盆地北部的浅层孔隙水(含水层埋深小于 50 m)也会向下越流补给深层水。由此建立北部重碳酸型深层水的混合模型,当岩溶

表 2 岩溶水、浅层孔隙水、汾河水的水化学组成

Table 2 Hydrogeochemistry of karst water, low-lying pore water and Fenhe River water											mg/L(pH 值除外)
室内编号	pH 值	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	TDS
盆地北部浅层孔隙水	7.6	70.9	46.2	1.02	82.1	62.6	127.4	370.0	21.3	0.6	597.1
盆地西部浅层孔隙水	7.4	360.3	102.1	9.92	173.7	421.6	811.3	333.7	24.0	0.8	2 070.6
北部山区岩溶水	7.8	60.4	28.6	0.86	12.0	15.4	51.1	268.7	20.0	0.3	323.0
西部山区岩溶水	7.4	139.0	42.3	2.40	19.4	23.1	325.5	232.0	1.0	1.0	669.6
汾河水	7.0	118.0	35.9	13.00	129.0	206.0	198.0	168.0	60.0	8.0	851.9

水、汾河水、浅层孔隙水的比例为 70%:20%:10% 时,最终混合溶液的各主要矿物(硬石膏、文石、方解石、白云石、石膏)的饱和指数与深层孔隙水各主要矿物的平均饱和指数十分接近(表 3),因此可以推断:北部山区的岩溶水是盆地北部重碳酸型深层水的主要补给来源,而汾河水的渗漏与浅层孔隙水的越流补给则是深层水水化学组分形成的次要原因。

盆地西部深层孔隙水的水化学类型为硫酸—重碳酸型、重碳酸—硫酸型、硫酸—氯化物型(代表性水样为 S12、S15、S19、S23、S24),推断西部边山岩溶水与盆地西部浅层孔隙水的混合作用为其水化学组分形成的主要原因。同样建立混合模型,当岩溶水、浅层孔隙水的比例为 50%:50%时,最终混合溶液的硬石膏、文石、方解石、白云石、石膏等矿物的饱和指数与深层孔隙水中上述矿物的平均饱和指数最为接近(表 3),可以认为西部边山岩溶水与盆地西部浅层孔隙水对该区域深层孔隙水化学组分的形成起到了同样重要的作用。

盆地南部深层孔隙水的水化学类型为重碳酸型(代表性水样为 S16、S20、S25),但与盆地北部的重碳酸型水相比,其各主要离子含量均有不同程度的增加。结合盆地深层水的流程图(图 1)来判断,南部深层水应由盆地北部与西部的深层水混合而成,混合模型表明,当北部深层水、西部深层水的混合比例为 50%:50%时,最终混合溶液的硬石膏、文石、方解石、白云石、石膏等矿物的饱和指数与深层孔隙水中上述矿物的平均饱和指数最为接近(表 3)。可以得出结论,盆地南部是区内深层水水位最低的区域之一,该处汇集了盆地北部与西部的深层水,其水化学组分的形成过程最为复杂。

由于缺乏东部边山岩溶水与盆地东部浅层孔隙水的水化学资料,故本文未分析盆地东部深层水的混合情况。但盆地北部、西部、南部深层水混合过程的地球化学模拟结果是非常令人满意的,这表明混合作用是控制区域水化学状况的最重要的因素。

表 3 混合溶液及深层孔隙水中硬石膏、文石、方解石、白云石、石膏的饱和指数

Table 3 Saturation indexes of anhydrite, aragonite, calcite, dolomite and gypsum in the mixed solution and deep pore water

饱和指数	硬石膏	文石	方解石	白云石	石膏
北部岩溶水、汾河水: 北部浅层孔隙水=70%:20%:10%	-1.94	0.18	0.32	0.63	-1.72
北部深层孔隙水	-2.59	0.19	0.33	0.70	-2.37
西部岩溶水、西部 浅层孔隙水=50%:50%	-0.88	0.40	0.54	0.89	-0.66
西部深层孔隙水	-1.19	0.43	0.58	1.04	-0.97
北部深层孔隙水: 西部深层孔隙水=50%:50%	-1.40	0.42	0.56	1.00	-1.19
南部深层孔隙水	-1.58	0.51	0.66	1.17	-1.36

4 结论

(1)太原市深层孔隙水的水化学类型在补给区水化学类型的基础上,随着地形、地貌、水文地质条件的变化,呈现有规律的水平分带,从山前到盆地依次分布有硫酸—重碳酸型水、重碳酸—硫酸型水、重碳酸型水等。(2)混合作用是控制区域水化学状况的最重要的因素。盆地北部的深层孔隙水受到北部边山岩溶水、盆地北部浅层孔隙水、汾河水的补给,其中北部边山岩溶水是最主要的补给源。而盆地西部的深层孔隙水由西部边山岩溶水与盆地西部浅层孔隙水混合而成。盆地南部的深层孔隙水则由盆地北部与西部的深层水混合而成。

References

Guillen, J., Palanques, A., 1997. A shoreface zonation in the Ebro Delta based on grain size distribution. *Journal of Coastal Research*, 13: 867—878.