

# 布隆湖水化学成分的形成机制

钱 会<sup>1</sup>, 李 健<sup>1</sup>, 窦 妍<sup>1</sup>, 杨炳超<sup>2</sup>, 赵振宏<sup>2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 在对研究区地质及水文地质条件进行分析的基础上, 根据对各类水样水质资料的分析, 得出与补给水相比, 布隆湖水中各组分含量普遍升高、TDS 显著增大、水化学类型由  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$  型变为  $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^-$  型、水质由良好的饮用水变为多种组分含量超标的不可饮水; 认为布隆湖水的化学成分是在补给水化学成分的基础上, 经过蒸发浓缩作用、溶解/沉淀及阳离子交替吸附作用而形成的。使用离子比值分析方法, 估算出河水进入布隆湖后, 蒸发比例高达 71.43%, 使各组分含量增大了约 3.5 倍; 质量平衡模拟结果表明, 形成湖水化学成分的主要化学作用是岩盐、石膏的溶解、方解石的沉淀以及  $\text{CO}_2$  的逸出, 此外还发生了少量的阳离子交替吸附作用。

**关键词:** 布隆湖; 水文地球化学; 质量平衡模拟; 形成机制

**中图分类号:** P641.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)01-0070-05

## Formation Mechanisms of Water Composition of Bulong Lake

QIAN Hui<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, DOU Yan<sup>1</sup>, YANG Bing-chao<sup>2</sup>, ZHAO Zhen-hong<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Institute of Geology and Minerals Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract** On the basis of hydrogeological condition of the studied area, the characteristics of chemical composition of lake water, river water and groundwater are analyzed. Comparing with the recharge water, the main changes of the composition of Bulong Lake are the marked increase of TDS and the concentration of various species, as well as the change of water type from  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$  to  $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^-$ . The causes of these changes are the lake water evaporation, dissolution/precipitation of minerals, and adsorption/desorption of cations. The ion ratio analysis is used to evaluate the proportion of lake water evaporation. The result shows as much as 71.43% water has been evaporated in the lake which makes the concentration of species in the lake increase 3.5 times. The calculated results of mass balance show the main chemical reactions in the formation of lake water composition are the dissolution of salt and gypsum, precipitation of calcite, outgasing of  $\text{CO}_2$ , and some ion exchange reactions.

**Key words:** Bulong Lake; hydrogeochemistry; mass balance model; formation mechanism

## 0 引言

布隆湖位于鄂尔多斯盆地西北部的都思兔河中段, 是由于都思兔河在 1977 年被拦截而形成的人工湖泊。都思兔河是黄河的支流之一, 发源于内蒙古自治区鄂托克旗附近(图 1), 其流向自东向西, 长度 166 km, 流域面积 4 160 km<sup>2</sup>, 年平均径流量 1 264 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> (0.4 m<sup>3</sup>/s), 最大洪峰流量 191 m<sup>3</sup>/s<sup>[1]</sup>。都思兔河流域地处欧亚大陆腹地, 属典型的大陆干旱季

风气候区, 降水量少而集中, 蒸发强烈, 多年平均降水量为 267.5 mm, 年蒸发量为 2 453.6 ~ 2 921.6 mm, 平均值为 2 459.1 mm。

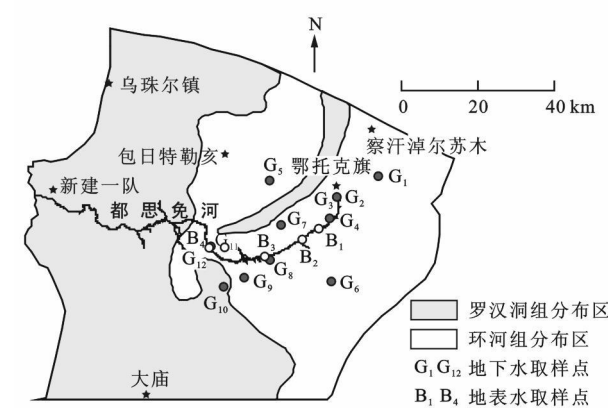
影响湖泊(水库)水质除自然地理、地质、水文地质条件及湖水的循环速率等因素外, 人为因素对湖泊水质的影响日益突出。关于湖泊水质问题的研究, 目前主要集中于由于人为原因所造成的污染评价及预测等方面<sup>[2-6]</sup>, 对湖泊水质形成的水化学机理的研究则很少。尤其在中国西北地区, 由于气

收稿日期: 2008-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772160); 中国地质调查局项目(1212010331302)

作者简介: 钱 会(1963-)男, 陕西泾阳人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, 从事水文地质教学研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

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



G<sub>1</sub> ~ G<sub>12</sub>—地下水取样点; B<sub>1</sub> ~ B<sub>4</sub>—地表水取样点

图 1 研究区地理位置及取样点分布

Fig 1 Location of the Study Area and the Distribution of the Sampling Points

候干燥、蒸发强烈、降水稀少、地质水文地质条件特殊,水库的修建到底怎样影响河流的水质,这是一个应引起充分重视并值得深入研究的问题。

都思兔河被拦截形成布隆湖后,与河水相比,湖水水质发生了很大变化,TDS 显著增大,水化学类型从 HCO<sub>3</sub> · Cl 型变化为 Cl · SO<sub>4</sub> · HCO<sub>3</sub> 型,水质由优良的饮用水变为 TDS 及多种组分含量超标的不可饮水。是什么原因造成了湖水化学成分的上述变化,笔者使用水文地球化学理论对其进行了深入分析,以期类似地区拦河造坝所造成的水质变化问题研究提供借鉴。

近年来,水文地球化学模拟理论得到了较快地发展,人们建立了众多的水化学模型来研究自然及人为因素所引起的水化学变化过程<sup>[7-9]</sup>,这些模型为本次研究工作奠定了良好的基础。

# 1 地质及水文地质条件

都思兔河流域的含水岩组主要包括新生界含水岩组、下白垩系保安群罗汉洞组含水岩组、环河组含水岩组以及洛河组含水岩组<sup>[10-11]</sup>。

新生界含水岩组是指由第四系、古近系和新近系地层所组成的含水岩组。其中,第四系岩层的岩性主要为细粉砂、粉质粘土和粉砂土。古近系和新近系主要是一套砂岩、粉砂岩、泥岩、底砾岩层,普遍夹有石膏,这也使得该含水岩组的水质普遍较差。新生界含水岩组主要分布在研究区西部,大部分与罗汉洞组的分布区域重叠(图 1)。

罗汉洞组含水岩组包括白垩系保安群泾川组和罗汉洞组地层,为一套陆相碎屑岩沉积,岩性主

要为砂岩、砂砾岩,厚度 200 ~ 562 m。环河组含水岩组由华池、环河组地层组成,主要出露于研究区的东部及西南角的部分地区。岩性主要为砾岩、砂砾岩,厚度 281 ~ 768 m。由下而上,碎屑粒度总体上由粗变细,是研究区内的主要承压水含水岩组。洛河组含水岩组包括洛河组、宜君组地层,在研究区内未见出露,在区域上洛河组岩性为砂岩、细砂岩、砾岩,厚度大于 390 m。

都思兔河为一主要由地下水补给而形成的河流,在河流北部,各含水岩组地下水均向西南方向径流,在河流南部,地下水则均向西北方向径流<sup>[1]</sup>。在垂向上,东部地区浅层地下水的水位一般高于深层水,因此地下水的径流方向是从上向下;西部地区则是深层地下水的水位高于浅层水,故地下水从下向上径流。区内地下水的排泄方式主要是向都思兔河的排泄、人工开采以及西部边界附近的浅层水通过地下径流向区外排泄。

# 2 湖水、河水及地下水化学特征

表 1 列出了 2004 年 9 月在布隆湖及其上游所取地表水及地下水样的水质分析结果,表中 G<sub>1</sub> ~ G<sub>12</sub>为地下水, B<sub>1</sub> ~ B<sub>4</sub> 为地表水,其中 B<sub>1</sub> ~ B<sub>3</sub> 为都思兔河水, B<sub>4</sub> 为布隆湖水,表中各水样的取样点位置见图 1。这里需要说明的是,表 1 中的水样是按从上游到下游的顺序排列的,例如,排列在 B<sub>1</sub> 前面的水样均位于 B<sub>1</sub> 的上游;排列在 B<sub>2</sub> 与 B<sub>3</sub> 之间的水样位于 B<sub>3</sub> 的上游、B<sub>2</sub> 的下游,其他类同。表中最后三列的 S<sub>cal</sub>、S<sub>dol</sub> 和 S<sub>gss</sub> 分别为水样相对方解石、白云石及石膏的饱和指数,它是在按照文献<sup>[12-13]</sup>所介绍的方法对各水样的水溶组分平衡分布进行计算的基础上,按下式计算的

$$S = \lg \frac{P}{K} \tag{1}$$

式中: K 为矿物溶解反应的平衡常数; P 为矿物溶解反应中相关离子的活度积; S > 0, 表示该矿物相对水溶液处于过饱和状态; S < 0, 表示该矿物相对水溶液未达到饱和状态;而当矿物的饱和指数 S 为 0 时,表示水溶液与矿物正好处于平衡状态。

表 1 水质分析表明,在所有的地下水样中, G<sub>12</sub> 号水样的 TDS 最高,为 905 74 mg/L。除了 G<sub>12</sub> 号地下水样外,河水的 TDS 均高于其他地下水。布隆湖水的 TDS 最高,达到了 2 922 74 mg/L,是 G<sub>12</sub> 号地下水 TDS 的 3 倍多。与此相应,湖水中各组

表 1 布隆湖水、都思兔河水及河流附近地下水的水质分析结果

Tab. 1 Chemical Analysis Results of Bulong Lake Water, River Water and Nearby Groundwater												$\rho_{\text{B}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		
编号	含水层位	TDS	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>cal</sub>	S <sub>dol</sub>	S <sub>gys</sub>
G <sub>1</sub>	环河组	327.53	7.7	23.11		60.96	25.34	42.79	35.54	155.05	0.00	-0.019	-0.381	-2.044
G <sub>2</sub>	环河组	629.77	8.3	130.23		47.10	26.75	40.42	44.43	358.48	0.00	0.526	0.843	-2.114
G <sub>3</sub>	环河组	592.56	7.6	125.20		44.10	29.20	39.00	76.80	341.70	0.00	0.034	-0.075	-1.910
G <sub>4</sub>	环河组	524.36	7.7	184.00		15.03	4.38	145.00	95.10	161.70		-0.636	-1.771	-2.233
B <sub>1</sub>	河水	606.07	8.3	190.00	3.65	21.00	17.10	83.60	95.60	357.00	6.00	0.441	0.828	-2.140
B <sub>2</sub>	河水	619.18	8.4	190.00	4.55	26.10	8.30	99.30	121.50	308.10	9.00	0.574	0.685	-1.939
G <sub>5</sub>	环河组	362.15	7.7	99.80		21.40	12.30	44.00	59.60	222.10		-0.318	-0.842	-2.248
G <sub>6</sub>	环河组	268.17	7.4	22.50		52.10	5.50	16.00	40.80	115.90	0.00	-0.500	-1.942	-1.982
G <sub>7</sub>	环河组	384.71	8.4	83.62		36.37	19.50	62.47	64.22	158.83	6.24	0.481	0.729	-2.015
G <sub>8</sub>	环河组	243.57	8.8	95.60		2.81	0.36	32.98	40.83	129.97	12.00	-0.254	-1.364	-3.224
B <sub>3</sub>	河水	755.12	8.4	250.00	5.45	22.00	13.10	122.30	145.50	363.10	12.00	0.547	0.905	-1.974
G <sub>9</sub>	新生界	461.62	7.6	77.17		21.91	56.97	47.03	55.83	405.42		-0.198	0.055	-2.368
G <sub>10</sub>	环河组	566.53	7.6	189.00		16.89	13.84	109.92	132.56	206.64		-0.603	-1.259	-2.072
G <sub>11</sub>	环河组	525.02	8.9	170.40		16.50	0.00	80.70	205.30	98.55	3.60	0.334	-8.519	-1.884
G <sub>12</sub>	洛河组	905.74	8.1	244.80		61.10	0.60	76.20	492.80	59.80	0.00	-0.156	-2.295	-1.067
B <sub>4</sub>	湖水	2 922.74	8.3	1 010.00	18.50	26.10	47.10	616.80	734.90	912.20	9.00	0.699	1.690	-1.532

分质量浓度显著增大,其中增加最明显的是 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 及 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,依次达到了 1 010、616 8、734 9、912 2 mg/L。湖水中 TDS、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量分别是饮用水水质标准的 2 92、2 47、2 94 倍。

图 2 绘出了研究区所有水样的 Piper 图,由图可见,研究区河水主要为 HCO<sub>3</sub> ° Cl-Na 型水。地下水除了 G<sub>11</sub>、G<sub>12</sub> 号水样为 SO<sub>4</sub>-Na 型水外,其他主要为 HCO<sub>3</sub> ° Cl-Na(Ca、Mg)型水,而布隆湖水则为 Cl ° SO<sub>4</sub> ° HCO<sub>3</sub>-Na 型水。从水样相对矿物的饱和指数来看,地表水(包括布隆湖水)相对方解石

和白云石均处于过饱和状态,大部分地下水相对这两种矿物是处于未饱和状态的,对于石膏来说,无论是地下水还是地表水均未达到饱和状态。

可见,主要由上游河水及地下水补给的布隆湖水,其水化学成分发生的主要变化是各组份含量普遍升高,TDS 显著增大,水化学类型由 HCO<sub>3</sub> ° Cl 型水变为 Cl ° SO<sub>4</sub> ° HCO<sub>3</sub> 型水,水质由优良的饮用水变为不可饮水。

3 布隆湖水化学成分的形成机制

布隆湖水主要补给源为河水,由于大多数地下水与河水的化学特征类似,这里以河水对湖水的补给为例,对布隆湖水化学成分的形成机制进行讨论。

3.1 湖水蒸发比例的估计

从 B<sub>3</sub> 到 B<sub>4</sub>,河水的 TDS 及各离子的质量浓度均有不同程度的增加。由于在 B<sub>4</sub> 点修坝形成了大面积的水面,大大增强了河水的蒸发浓缩作用,而且 2004 年 9 月所取的样品,是经过一个夏季的强烈蒸发后残存的水,其中各离子含量的大量增加是很自然的。对 B<sub>4</sub>、B<sub>3</sub> 点的水质进行进一步分析发现,从 B<sub>3</sub> 到 B<sub>4</sub>,各离子含量增加的程度有很大的差别,如 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 在 B<sub>4</sub> 点的值依次是 B<sub>3</sub> 点的 5 04、5 05、4 04、3 60、3 39 倍;但 Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 增加的幅度要小一些,分别只是 B<sub>3</sub> 点的 1 19、2 51 倍;与此同时,TDS 则是 B<sub>3</sub> 点的 3.87 倍。

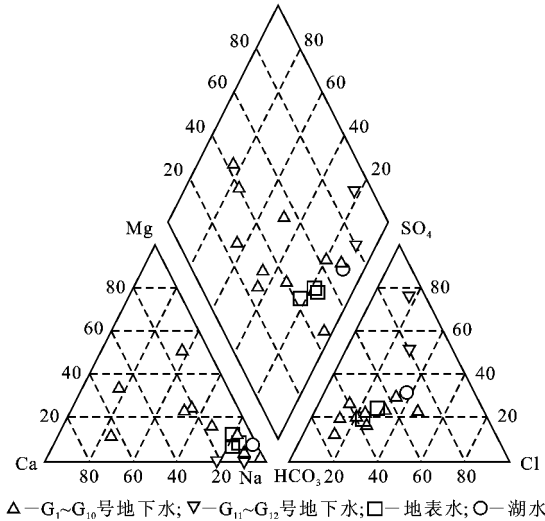


图 2 研究区水样 Piper 图

Fig 2 Piper Diagram for the Water Samples in the Study Area

如果没有其他化学反应的影响, 单独在蒸发浓缩作用的影响下, 各离子含量应该同步增大。上述各离子含量的变化明显表明, B<sub>4</sub> 点水质的形成还受到了其他作用的影响。这主要包括石膏和岩盐的溶解及方解石的沉淀作用, 支持这一观点的主要依据是:

(1) 研究区地处干旱地区, 区内零星分布的古近系和新近系地层中富含石膏、岩盐等蒸发盐类矿物, 而且河水相对这些矿物均处于未饱和状态。

(2) 方解石在 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 点上均处于过饱和状态, 且从 B<sub>3</sub> 到 B<sub>4</sub> 点, Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的增加幅度与 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 相比明显偏小, 那么在蒸发浓缩作用过程中水溶液中的 Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 哪里去了呢? 这自然使人想到了方解石的沉淀作用。

为了估计 B<sub>4</sub> 点水质形成过程中蒸发浓缩作用的程度, 应首先对其他化学反应对各离子含量变化的影响予以分析。由于岩盐的溶解作用, 水中 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 含量将在蒸发浓缩作用的基础上进一步增大, 因此单独在蒸发浓缩作用影响下, B<sub>4</sub> 点 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 含量与 B<sub>3</sub> 点对应离子含量的比值应比目前的值(5.04、4.04)小, 或者说用 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 含量的比值来估计蒸发浓缩作用的程度偏大。同样, 由于石膏溶解作用的影响, 用 B<sub>4</sub> 与 B<sub>3</sub> 点 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量的比值(5.05)来估计蒸发浓缩作用的程度也是偏大的。对于 Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 来说, 由于发生了方解石的沉淀作用, 因此用它们的比值(1.19、2.51)来估计蒸发浓缩作用的程度则有所偏小。对于 TDS 的比值来说, 由于方解石的沉淀在一定程度上是在石膏溶解作用影响下, 使 Ca<sup>2+</sup> 进入水中而造成的, 因此, 岩盐及石膏溶解量的总和对 TDS 的贡献要大于方解石沉淀使 TDS 的减少量, 所以用 TDS 的比值(3.87)来估计蒸发浓缩作用的程度也是偏大的, 但显然要比用 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比值所作的估计更接近实际蒸发浓缩作用的影响。这样, 就把蒸发浓缩作用对湖水中各离子浓度影响的比值范围限定在 2.51~3.87 之间。与上述各组分相比, 用 Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 离子含量比值来估计蒸发浓缩作用的程度可能更符合实际一些, 因为水溶液中影响这两种离子含量化学反应的速度与上述离子相比一般都要慢一些。因此, 笔者采用 Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 含量比值的平均值(3.5)来估算蒸发浓缩作用对各离子含量的影响, 即在由 B<sub>3</sub> 点的水质形成 B<sub>4</sub> 点水质的过程中, 仅蒸发浓缩作用就使各离子的浓度增大了 3.5 倍, 或者说 B<sub>4</sub> 处湖泊水(布隆

湖)的蒸发比例达到了 71.43%。

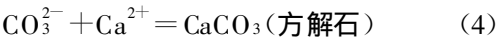
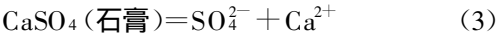
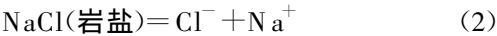
3.2 湖水成分形成的化学作用

表 2 把 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 以及 B<sub>3</sub> 经上述比例蒸发后所形成的水的化学成分进行了比较, 可见 B<sub>3</sub> 点的水质经过单纯蒸发作用后, 虽然更接近于 B<sub>4</sub> 点的水质, 但两者还有相当大的差别, 这种差别主要是由于相关的化学反应而造成。由表 1 的矿物饱和指数计算结果可见, B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 点上岩盐和石膏均处于未饱和状态, 方解石处于过饱和状态。据此, 笔者认为形成湖水化学成分的主要反应是岩盐、石膏的溶解, 方解石的沉淀以及 CO<sub>2</sub> 的逸出(这是伴随方解石沉淀过程的一种常见作用), 具体如下

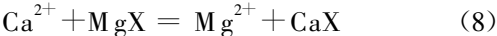
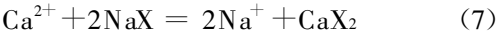
表 2 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 及 B<sub>3</sub> 经过蒸发作用后的水质比较  
Tab. 2 Comparison of the Chemistry of B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub> and the Evaporated Residual of B<sub>3</sub> ρ<sub>B</sub>/(mg·L<sup>-1</sup>)

编号	TDS	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
B <sub>3</sub>	755.12	250	5.45	22.0	13.10
蒸发后	2 642.92	875	19.08	77.0	45.85
B <sub>4</sub>	2 922.74	1 010	18.50	26.1	47.10

编号	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
B <sub>3</sub>	122.30	145.50	363.10	12
蒸发后	428.05	509.25	1 270.85	42
B <sub>4</sub>	616.80	734.90	912.20	9



同时, 由于岩盐的溶解不能完全解释 B<sub>4</sub> 点水溶液中 Na<sup>+</sup> 的增加, 而且 B<sub>4</sub> 点的 Mg<sup>2+</sup> 与蒸发后的水相比也有少量增大。考虑到水流进入布隆湖后流速急剧减小, 在湖底形成了大量细粒沉积物, 这里用下述的离子交替吸附作用来对其予以解释



这样, 反应式(2)~(8)便组成了湖水化学成分形成的主要化学作用。

3.3 化学反应量的计算

既然可认为湖水的化学成分是在 B<sub>3</sub> 点河水化学成分蒸发的基础上通过反应式(2)~(8)而形成的, 那么上述各反应量的大小即成为一个重要的问题, 使用质量平衡模型, 可对其进行计算。质量平衡模拟的基本原理是<sup>7,9</sup>, 假定沿着水流途径测定

了 2 个点上的水质, 记上游点的水质为初始水质, 下游点的水质为终点水质, 则有

初始水质 + 反应物 = 终点水质 + 产物 (9)

在本问题中, 初始水质为经过蒸发后的 B<sub>3</sub> 点的河水, 终点水质为布隆湖水。设湖水在初始水质的基础上, 每升水中溶解了  $x_1$  (mmol) 的第 1 种矿物(溶解为正, 沉淀为负)、 $x_2$  (mmol) 的第 2 种矿物、...、 $x_n$  (mmol) 的第  $n$  种矿物后, 形成了终点水质, 且与初始水质相比, 终点水质中第  $i$  种元素的增量为  $b_i$  (mmol), 则有

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中:  $a_{ij}$  为第  $i$  种元素相对第  $j$  种矿物的化学计量数, 它在数值上等于 1 mol 的第  $j$  种矿物完全溶解时所生成的第  $i$  种元素的摩尔数。以 Na、K、Ca、Mg、Cl、C、S 作为平衡元素, 求解线性方程组(10), 便可得到各化学反应的反应量。

表 3 列出了布隆湖水化学成分形成过程中反应式(2)~(8)的化学反应量, 表中反应式(6)的反应量是用  $K^+$  的吸附量来表示的, 其他类同。表 3 的计算结果印证了前述的定性认识, 即由蒸发后的水形成 B<sub>4</sub> 点水质的过程中, 岩盐、石膏的溶解和方解石的沉淀以及 CO<sub>2</sub> 的逸出是主要的化学反应, 当然, 也发生少量的阳离子交替吸附作用。

表 3 形成 B<sub>4</sub> 点湖水水质的化学反应量计算结果

Tab. 3 Calculated Results for the Reactions That Forming the Chemistry of Water in B<sub>4</sub>

$c_b / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$						
反应(2)	反应(3)	反应(4)	反应(5)	反应(6)	反应(7)	反应(8)
5.39	2.35	-3.33	-3.09	-0.01 ( $K^+$ )	-0.24 ( $Ca^{2+}$ )	-0.05 ( $Ca^{2+}$ )

在布隆湖水化学成分形成过程中, 溶解沉淀、吸附解吸及蒸发浓缩作用同时在进行, 蒸发浓缩作用主要发生在河水被拦截后所形成的布隆湖中, 并由此导致了一系列溶解/沉淀作用发生, 这里主要是为了分析上的方便才对其分别进行了讨论。

4 结语

(1)布隆湖水主要由上游河水补给, 与补给水相比, 湖水化学成分发生了巨大变化, 各组分含量普遍升高, TDS 显著增大, 水化学类型由 HCO<sub>3</sub> · Cl 型水变为 Cl · SO<sub>4</sub> · HCO<sub>3</sub> 型水, 水质由优良饮用水变为 TDS 及多种组分含量超标的不可饮水。

(2)根据定性分析及水化学模型定量模拟结果, 可认为布隆湖水化学成分是在河水化学成分基础上, 经过蒸发浓缩、溶解/沉淀及阳离子交替吸附作用而形成。其中蒸发作用是主要作用, 使各组分质量浓度增大了约 3~5 倍; 形成湖水化学成分的主要化学反应是岩盐、石膏的溶解、方解石沉淀以及 CO<sub>2</sub> 逸出, 此外还发生了少量的阳离子交替吸附作用。

(3)由布隆湖水化学成分的形成机制来看, 在干旱地区修建水库等地表水体, 由于蒸发所造成的水资源损失是巨大的, 同时由于蒸发及相关化学反应的影响, 可导致地表水体水质的恶化。

参考文献:

[ 1 ] 钱 会, 奚 妍, 李西建, 等. 都思兔河氢氧稳定同位素沿流程的变化及其对河水蒸发的指示[ J ]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 107-112.

[ 2 ] 刘曾美, 王祥三, 张国庆. 湖库水质评价综合模糊优化模型的研究应用[ J ]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 46-51.

[ 3 ] 徐红敏, 杨天行. 基于支持向量机分类算法的湖泊水质评价研究[ J ]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(4): 570-573.

[ 4 ] 陈丽燕, 付 强, 魏丽丽. 多元联系数在湖泊水质综合评价中的应用[ J ]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 82-86.

[ 5 ] 陈朋成, 周孝德, 靳春燕, 等. 黄河上游羊曲水库水质预测研究[ J ]. 人民黄河, 2008, 30(4): 42-43.

[ 6 ] 焦瑞峰, 吴 昊, 师 洋. 基于灰色关联分析的蒙特卡罗法建立水库出库水质预测模型[ J ]. 环境工程, 2006, 24(4): 63-65.

[ 7 ] Plummer L N, Parkhurst D L, Thorstenson D C. Development of Reaction Models for Groundwater Systems [ J ]. Geochim Cosmochim Acta, 1983, 47(4): 665-685.

[ 8 ] 王 丽, 王金生, 林学钰. 水文地球化学模型研究进展[ J ]. 水文地质工程地质, 2003, 30(6): 105-109.

[ 9 ] 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.

[ 10 ] 李云峰, 冯建国, 王 玮, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系含水层系统分析[ J ]. 西北地质, 2004, 37(1): 90-96.

[ 11 ] 谢 渊, 王 剑, 江新胜, 等. 鄂尔多斯盆地白垩统含水层储水岩石特征与介质结构研究[ J ]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 11-19.

[ 12 ] Crear D A. A Method for Computing Multicomponent Chemical Equilibria Based on Equilibrium Constants[ J ]. Geochim Cosmochim Acta, 1975, 39(10): 1375-1384.

[ 13 ] 钱 会. 水溶液中各化学组分可能存在形式分配及 Eh 值的计算方法[ J ]. 西安地质学院学报, 1987, 9(3): 69-80.