

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2012.05.002

北京市朝阳区地下水化学特征及其变化规律

李炳华¹, 崔学慧², 朱亚雷³, 郑凡东¹

(1. 北京市水利科学研究所, 北京 100048; 2. 中国石油大学理学院, 北京 102249;
3. 北京市朝阳区水务局, 北京 100026)

摘要:为了揭示北京市朝阳区水化学特征的形成机制,采集2007—2009年不同季节中共计144个地下水样品进行监测,应用相关分析法、水化学方法和离子比例法分析地下水水化学特征、影响因素和变化规律。结果表明:丰水期和枯水期地下水水化学组分差别较小。地下水阴离子中 HCO_3^- 占绝对主导地位且含量相对稳定,质量浓度均值在290~302 mg/L,而 Cl^- 受环境影响质量浓度变化较大,变异系数在95.7%~132%,阳离子则以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主,质量浓度均值分别为53~72 mg/L和49~62 mg/L,且 Na^+ 质量浓度变化稍大。总体上朝阳区地下水TDS中等,均值为449.4 mg/L,与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的质量浓度呈显著正相关关系。地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-NaCa}$ 为主,少数地段出现 $\text{HCO}_3\text{Cl-CaMg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{-NaCa}$ 。

关键词:地下水;水化学;离子比例法;北京市朝阳区

中图分类号:X523

文献标识码:A

文章编号:1004-6933(2012)05-0007-06

Hydrochemical characteristics and change of groundwater in Chaoyang District of Beijing City

LI Bing-hua¹, CUI Xue-hui², ZHU Ya-lei³, ZHENG Fan-dong¹

(1. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100048, China;

2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Water Service Bureau of Chaoyang District of Beijing City, Beijing 100026, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of formation of hydrochemical characteristics of the groundwater in the Chaoyang District of Beijing City, 144 groundwater samples were collected and analyzed in different seasons from 2007 to 2009. Correlation analysis and hydrochemical and ion ratio methods were used to identify the hydrochemical characteristics, influencing factors, and change of groundwater in this region. The results show the following: First, there was no significant difference in the component content of groundwater in flood and dry periods. Second, HCO_3^- was the dominant anion with an average content ranging from 290 to 302 mg/L, and the content of Cl^- fluctuated relatively more significantly with a variation coefficient ranging from 95.7% to 132%. Na^+ and Ca^{2+} were the dominant cations with average contents ranging from 53 to 72 mg/L and 49 to 62 mg/L, respectively, and the content of Na^+ changed significantly. On the whole, the content of TDS in the groundwater of this region was moderate with an average value of 449.4 mg/L, and was in significantly positive correlation with the contents of Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} . The hydrochemical type of groundwater was mainly $\text{HCO}_3\text{-NaCa}$, and occasionally $\text{HCO}_3\text{Cl-CaMg}$ or $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{-NaCa}$ in some locations.

Key words: groundwater; hydrochemistry; ion ratio method; Chaoyang District of Beijing City

地下水在径流过程中与周围介质不断发生水岩相互作用,水中的化学成分随着地下水的运动不断

发生变化。因此,通过水化学资料可以探寻地下水的赋存环境、径流途径及物质交换等重要信息,从而

揭示地下水的循环规律。近年来,北京朝阳区的区域水循环各要素在自然和人为因素的共同作用下已发生了重大变化,如连续多年偏枯、地表水体大幅度减少、地下水位持续下降等。在这些因素的影响下,作为自然环境因子和水循环组成要素的地下水的补给和演化条件也发生了改变,重新判定该区域地下水的水化学演化规律十分必要。

1 研究区域概况

朝阳区位于北京城区东部,总面积为 470.8 km²,年最大降水量和最小降水量分别为 1088.6 mm 和 306.7 mm,1956—2009 年平均降水量为 566.5 mm,降雨多集中在 5—9 月份,1956—2009 年平均水面蒸发量为 1200 mm。整体地势西北高、东南低,地面坡度为 1/1000 ~ 1/2500。地貌属冲洪积相,大致可以分为:冲积扇平原、扇缘洼地和河流冲积平原 3 种类型,其中冲洪积平原属永定河冲洪积扇的中下部地带,约占全区总面积的 80%。第四系堆积过程中受到不同规模的冰期作用,造成该区的水文地质条件复杂,总体上第四系松散沉积物厚度由西向东逐渐加厚。根据钻孔资料,西部含水层岩性主要为砂砾石,而东部以砂层为主,厚度为 20 ~ 70 m,各地段富水性相差悬殊。潜水含水层主要接受大气降水、灌溉入渗及河流侧向补给,排泄方式主要是人工开采及向深部含水层越流补给^[1]。承压含水层有数层厚度不等的砂、砂砾石组成,主要接受永定河冲洪积扇前部及潮白河冲洪积扇侧向径流补给、潜水含水层越流补给^[2]。由于长期超采,浅层地下水埋深下降 20 ~ 30 m。朝阳区的地下水水流方向的总体趋势为自西南向东北,局部地段存在降落漏斗,西侧和南侧接受邻区的地下水侧向补给,东侧有少量的流出。

2 采样与分析

2007—2009 年,每年 4 月(枯水期)和 9 月(丰水期)采集区内 24 眼观测井(其中浅井 12 眼,井深 80 ~ 150 m;深井 12 眼,井深 150 ~ 300 m)水样各 1 次,即每年采集 48 个地下水样品,3 年合计 144 个,取样井分布见图 1。

采集水样时,先用地下水样清洗样品瓶 3 次,所有采集的地下水样品均在北京市水文总站水化学分析实验室中监测,测试的项目包括: NO₃⁻、CO₃⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、pH 值和电导率,其中 CO₃⁻ 和 HCO₃⁻ 的测试方法为酸碱滴定法, NO₃⁻、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 的测试方法为离子色谱法, Ca²⁺、Mg²⁺ 的测试方法为 EDTA 滴定法, K⁺、Na⁺ 的测试方法为火焰原子吸收分光光度法, pH 值用电位

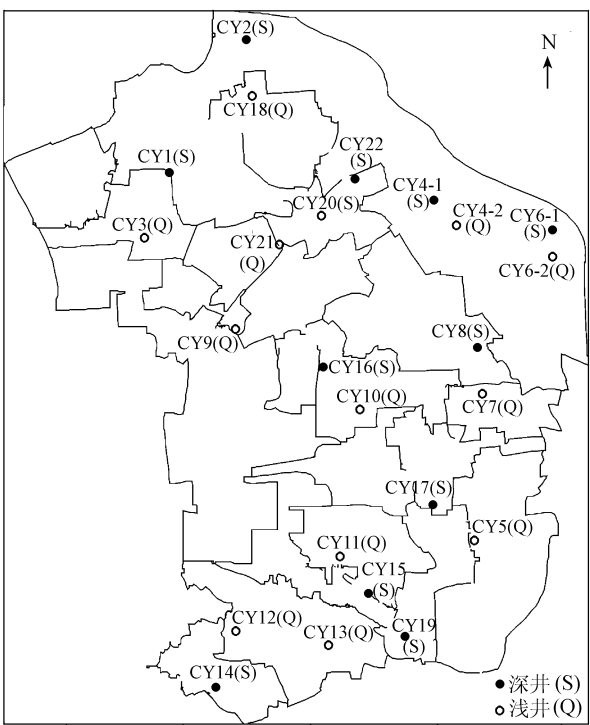


图 1 地下水取样井分布

法测定,电导率用电导仪测定。

根据监测的水化学数据,利用 SPSS18.0 软件开展水化学组分统计分析和相关性分析,应用 Aquachem 软件分析朝阳区地下水水化学类型,结合地下水水化学资料和文献,研究朝阳区地下水水化学演化原因。

3 结果与讨论

3.1 枯、丰水期对地下水水化学组分影响

为反映枯、丰水期对地下水化学组分的影响,对 2007—2009 年地下水枯、丰期水的监测数据进行统计分析,各年度枯、丰水期水化学组分监测结果相差不大:地下水中各主要组分在枯、丰水期的含量有一定程度变化,但变化幅度较小。以 2009 年的水化学组分为例,枯、丰水期 Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 质量浓度均值相差较小,分别为 0.8 mg/L、3.1 mg/L 和 14.2 mg/L,约占各组分浓度的 2%、2.1% 和 5%,并且 3 种阴离子枯、丰期变异系数差值也较小,不超过 7%。相对于阴离子变化,阳离子枯、丰期均值差稍大, Mg²⁺、Ca²⁺ 和 Na⁺ 的质量浓度分别为 6.8 mg/L、12.2 mg/L 和 15.1 mg/L,占各组分的 22% ~ 34% 之间;从各组分的变异系数看,阳离子中 K⁺、Na⁺ 和 Mg²⁺ 均超过 10%,而 Ca²⁺ 相对较小,为 6.3%。从主要阴阳离子的标准偏差看,枯、丰水期的 HCO₃⁻ 最大,均在 85% 以上, K⁺ 最小,均小于 1%,其他阴阳离子大多在 20% ~ 40% 之间,反映 HCO₃⁻ 含量偏离算术均值较多,而 K⁺ 的偏离较少(表 1)。

表 1 2009 年北京市朝阳区枯、丰水期地下水水化学参数统计 (n=2×24)

组分	均值/(mg·L ⁻¹)		最大值/(mg·L ⁻¹)		最小值/(mg·L ⁻¹)		标准偏差/(mg·L ⁻¹)		变异系数/%	
	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰
Cl ⁻	42.8	43.6	144.0	170.0	6.5	9.5	36.2	39.7	84.6	91.2
SO ₄ ²⁻	66.3	63.2	228.0	197.0	25.2	34.8	42.4	34.3	64.0	54.3
HCO ₃ ⁻	299.5	285.3	590.0	627.0	140.0	204.0	85.1	87.3	28.4	30.6
K ⁺	2.1	1.1	3.8	2.1	0.4	0.2	0.9	0.6	41.5	55.5
Na ⁺	62.6	47.5	128.0	122.0	16.4	12.7	29.4	27.2	47.0	57.2
Ca ²⁺	67.7	55.5	123.0	135.0	28.1	17.9	30.0	28.1	44.3	50.6
Mg ²⁺	20.0	26.8	40.7	41.5	1.6	3.9	12.9	37.1	64.4	53.2

通常地下水接受不同的补给来源,其电导率变化很大^[3]。仍以 2009 年枯、丰水期地下水电导率的监测值为例,绝大部分小于 1 000 μS/cm,而且大部分枯水期电导率值大于丰水期电导率值,仅 CY10、CY11 和 CY14 地下水井电导率大于 1 000 μS/cm,其中 CY10、CY11 为浅井(注:本文以 150 m 深为界,将地下水井划分为浅井和深井),明显已受到降水入渗的影响,而 CY14 离凉水河较近,凉水河为北京市主要的排污河道,水质较差,而且由于河道清淤,加强了凉水河与地下水的联系,从电导率值可以推测 CY14 很可能受到凉水河的影响。从深度角度看,深层地下水受季节影响较浅层的小,反映出深层地下水接受补给源简单、水化学组分相对稳定的特征(图 2)。

3.2 地下水主要水化学组分特征及形成原因

鉴于季节变化对不同深度地下水化学组分的影响相对较小,此次研究取各年地下水主要组分监测结果平均后统计分析,可以看到:2007—2009 年朝

阳区地下水阴离子以 HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 为主,其中 HCO₃⁻ 的质量浓度最高,均值在 290.8 ~ 301.1 mg/L;其次是 SO₄²⁻,均值约为 63.4 ~ 76.6 mg/L;Cl⁻ 均值相对较小,约为 44.6 ~ 57.4 mg/L。阳离子则以 Na⁺、Ca²⁺ 为主,均值分别为 53.8 ~ 71.4 mg/L 和 49.9 ~ 61.1 mg/L;其次是 Mg²⁺,均值为 17.8 ~ 19.9 mg/L;而 K⁺ 质量浓度相对较低,均值仅为 1.6 ~ 2.2 mg/L。从各组分质量浓度 3 a 的变异系数看,阴离子中 Cl⁻ 各年度的变异系数最大(95.7% ~ 131.6%),说明其含量变化较大,是随环境因素而变化的敏感因子,其次是 SO₄²⁻(57.9% ~ 70.5%),而 HCO₃⁻ 的变异系数相对较小,说明其含量相对稳定;4 种阳离子中变异系数中 Ca²⁺ 年际间相对变化较小,而 Na⁺ 的变化稍大,说明 Na⁺ 受环境影响相对较大。从标准偏差看,总体上阴离子的大于阳离子的,说明阴离子质量浓度偏离其算术均值大而阳离子的较小(表 2)。

通常地下水中 pH 值的大小直接影响碳酸存在

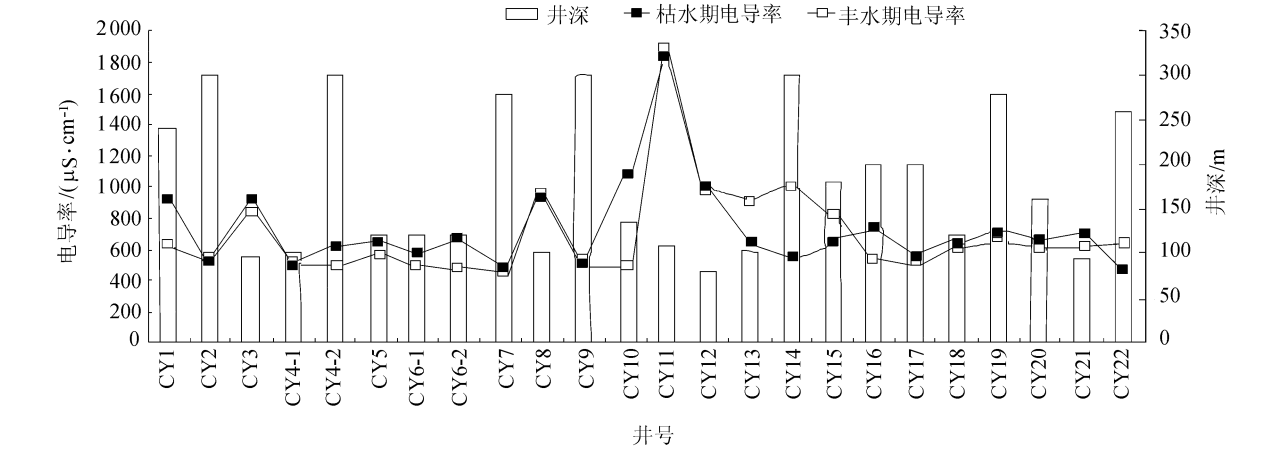


图 2 枯、丰水期取样井地下水电导率值变化

表 2 2007—2009 年北京市朝阳区地下水组分参数统计 (n=3×24)

组分	均值/(mg·L ⁻¹)			标准偏差/(mg·L ⁻¹)			变异系数/%		
	2007 年	2008 年	2009 年	2007 年	2008 年	2009 年	2007 年	2008 年	2009 年
Cl ⁻	57.4	48.3	44.6	75.5	54.6	42.7	131.6	113.1	95.7
SO ₄ ²⁻	73.4	76.6	63.4	51.7	45.0	36.7	70.5	58.7	57.9
HCO ₃ ⁻	297.6	301.1	290.8	72.5	72.7	79.0	54.7	40.0	27.2
K ⁺	2.2	2.0	1.6	0.9	0.6	0.6	40.6	31.4	40.2
Na ⁺	62.4	71.4	53.8	31.4	28.1	26.0	50.3	39.4	48.4
Ca ²⁺	55.1	49.9	61.1	27.1	21.5	26.7	49.2	43.2	43.7
Mg ²⁺	18.1	17.8	19.9	9.1	7.6	10.5	50.1	42.4	52.6

的形态,在偏酸、偏碱及中性水中 HCO_3^- 占优势,而朝阳区地下水 pH 监测值范围在 7.6 ~ 8.5 之间,为偏碱性水,因此朝阳区地下水中表现为 HCO_3^- 含量占优的特征。天然水中的 Cl^- 浓度的变化主要是受水文循环中的混合以及蒸发、盐的溶解、离子过滤和扩散等作用的影响。北京平原区工业化前的地下水中 Cl^- 的输入值小于或等于 6.8 mg/L;大气轻微污染条件下的降水 Cl^- 输入在 6.8 ~ 20 mg/L 之间,可以近似地把 $\rho(\text{Cl}^-) \leq 20 \text{ mg/L}$ 定为区域性(北京地区)大气轻微污染条件下的降水 Cl^- 输入;而 $\rho(\text{Cl}^-) > 20 \text{ mg/L}$ 的地下水,输入来源就比较复杂,主要包括降水携带大气和地面污染物入渗、降水和地表污染水体入渗,以及矿物溶解^[4]。2007—2009 年朝阳区地下水 $\rho(\text{Cl}^-) > 44 \text{ mg/L}$,由此可以推测朝阳区地下水 Cl^- 受多种因素影响。另有资料表明,朝阳区东北部温榆河对地下水有一定的补给,河水 pH 平均值为 7.86,呈偏碱性环境,阴离子以 HCO_3^- 为主,质量浓度平均值为 296.2 mg/L,阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主,质量浓度平均值分别为 58.63 mg/L 和 55.04 mg/L^[5],与之对照,2009 年监测靠近温榆河的浅井 CY6-1,阴、阳离子也是以 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,且各离子质量浓度与地表水的相差 10 ~ 30 mg/L。综合以上分析可知,朝阳区地下水受大气降水和地表水的入渗补给影响。

在地下水流场中,地下水各化学组分存在着有机联系,地下水各种组分之间的含量比例系数常用来研究某些水文地球化学问题^[6]。 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数称为地下水的成因系数,是表征地下水中 Na^+ 富集程度的一个水文地球化学参数。海水的 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数平均值为 0.85,低矿化度水具有较高的 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数($\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}} > 0.85$),高矿化度水具有较低的 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数($\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}} < 0.85$)^[7-8]。朝阳区地下水样分析点大多位于直线 1 : 1 以上,说明 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数大于 1 (图 3)。通常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,同时水中 Ca^{2+} 和土壤岩石中 Na^+ 发生交换,从而使 Na^+ 含量大于 Cl^- 含量。 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数小于 1 的点基本分布在该区的西北和东南地段,很可能与这些地段工农业生产导致的污染入渗有关。从 TDS 与 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 关系分析,朝阳区内 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数基本上随着 TDS 的增加呈下降的趋势,说明在低矿化度水体中,随着地下水流程和滞留时间的增长, Na^+ 开始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^+ 浓度减小,而 Cl^- 相对增加,导致 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 系数下降(图 4)。

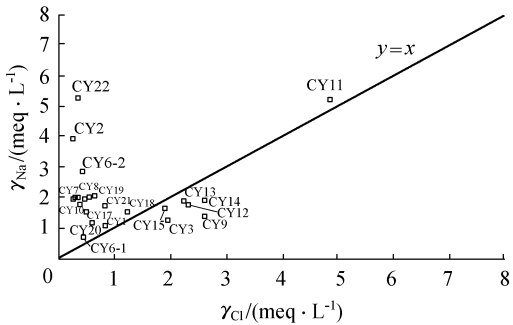


图 3 2009 年丰水期 γ_{Na} 与 γ_{Cl} 关系

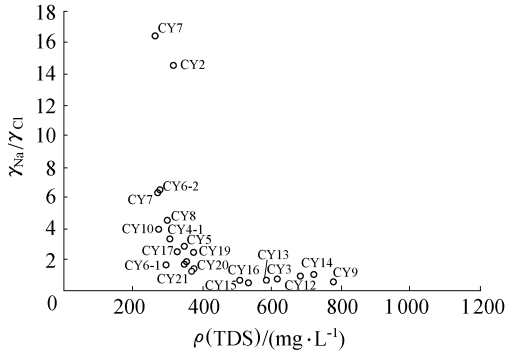


图 4 2009 年丰水期 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 与 TDS 关系

3.3 地下水 TDS 和主要化学组分的相关性分析

相关性分析可揭示地下水水化学组分的相似相异性及来源的一致性和差异性,而 TDS 值代表了水中溶解物含量,从 TDS 值的大小可以看出地下水的演化规律^[9]。笔者研究选取了 2009 年丰水期 24 个地下水样品 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 TDS 的监测结果,利用 SPSS18.0 软件进行相关性分析。2009 年丰水期 TDS 监测值大多在 276 ~ 600 mg/L,均值为 449.4 mg/L,仅有 4 个样品 TDS 值大于 600 mg/L,无论是浅井还是深井,TDS 值总体均较低(图 5)。

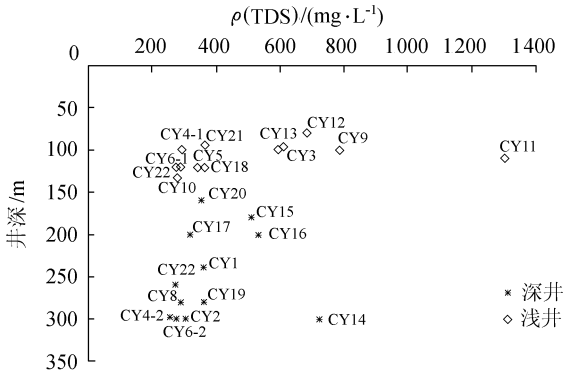


图 5 2009 年丰水期地下水 TDS 和井深关系

通常地下水流程越长,其 TDS 值越大,朝阳区绝大部分位于永定河冲洪积扇的中下部冲积平原,与永定河冲洪积扇上部地下水 TDS 值比较(均值 230 mg/L),朝阳区的明显较高,约是其 2 倍。资料

表明,当 TDS 小于 600 mg/L 时,难以生成方解石 (CaCO₃) 和白云石 (CaMg (CO₃)₂) 的沉淀,因此朝阳区 Ca²⁺、Mg²⁺ 与 HCO₃⁻ 呈正相关,且相关系数较高。这点从 TDS 和 (γ_{Ca²⁺}+γ_{Mg²⁺}) 关系也可看出, (γ_{Ca²⁺}+γ_{Mg²⁺}) = 0.008 4ρ(TDS)+0.65, R² 为 0.830 3 (图 6)。从朝阳区内 TDS 值分布看,东北部和东部的相对较低,其原因可能是这些地段存在地下水降落漏斗,水交替作用强烈,导致 TDS 值偏低。朝阳区阴离子 Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 与阳离子 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的相关性显著,相关系数在 0.67 以上,表明 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 主要来自各种硫酸盐,氯酸盐和重碳酸盐^[10-11]。研究显示,TDS 与 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 为显著正相关关系,相关系数达到 0.83 以上,而 NO₃⁻ 与 K⁺ 和 Na⁺ 相关性较差,说明 TDS 大小主要受 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 控制 (表 3)。

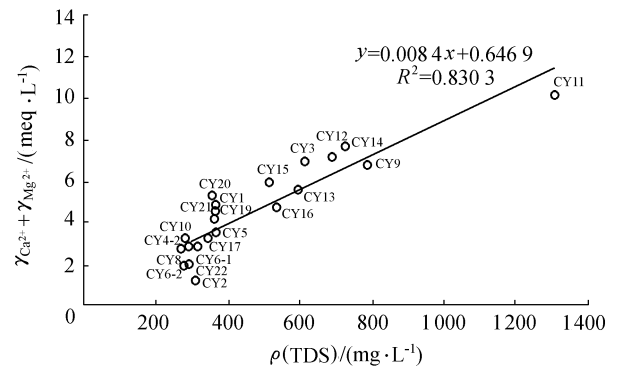


图 6 2009 年丰水期地下水 TDS 与 (γ_{Ca²⁺}+γ_{Mg²⁺}) 关系

表 3 2009 年丰水期地下水样中各组分的相关性分析 (n=24)

组分	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	TDS
Cl ⁻	1.00	0.91 **	0.41 *	0.91 **	0.49 *	0.13	0.89 **	0.83 **	0.94 **
SO ₄ ²⁻		1.00	0.16	0.90 **	0.40 *	0.29	0.79 **	0.67 **	0.85 **
NO ₃ ⁻			1.00	0.20	0.51 **	-0.42 *	0.58 **	0.63 **	0.57 **
HCO ₃ ⁻				1.00	0.39	0.27	0.84 **	0.75 **	0.83 **
K ⁺					1.00	-0.37	0.66 **	0.71 **	0.52 **
Na ⁺						1.00	-0.13	-0.25	0.10
Ca ²⁺							1.00	0.96 **	0.92 **
Mg ²⁺								1.00	0.88 **
TDS									1.00

注: * 为通过 0.05 显著性检验; ** 为通过 0.01 显著性检验。

3.4 地下水水化学类型及变化分析

利用 AquaChem 软件首先计算出主要阴离子 (HCO₃⁻+CO₃²⁻、Cl⁻、SO₄²⁻) 和阳离子 (Na⁺+K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺) 的量,将大于阴 (阳) 离子量总和的 10% 阴 (阳) 离子参与地下水化学类型分类,最后结合 Piper 模块得出地下水化学类型。鉴于季节变化对地下水化学组分影响不明显,选取 2007—2009 年各年度监

测数据的均值进行水化学类型分析。结果表明:朝阳区地下阴离子 HCO₃⁻ 占绝对优势,仅少数地段 Cl⁻ 或 SO₄²⁻ 含量超过阴离子总量的 10%;阳离子以 Na⁺ 和 Ca²⁺ 为主,少数地段 Mg²⁺ 含量超过阳离子总量的 10%。总体上看,各年度均以 HCO₃-NaCa 型地下水最多,出现次数依次为 12、12、10,其次为 HCO₃-CaMg,而 HCO₃-NaCaMg、HCO₃Cl-CaMg、HCO₃Cl-NaCa、HCO₃Cl-NaCaMg、HCO₃SO₄-CaMg 等类型亦有检出 (表 4)。

表 4 2007—2009 地下水取样井水化学类型

井号	水化学类型		
	2007 年	2008 年	2009 年
CY1 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCaMg	HCO ₃ -CaMg
CY2 (S)	HCO ₃ -Na	HCO ₃ -Na	HCO ₃ -Na
CY4-2 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa
CY6-2 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa
CY14 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -CaMg
CY15 (S)	HCO ₃ -NaCaMg	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -CaMg
CY16 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -CaMg
CY17 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa
CY19 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCaMg
CY20 (S)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -Na	HCO ₃ -NaCa
CY22 (S)	HCO ₃ -Na	HCO ₃ -Na	HCO ₃ -Na
CY3 (Q)	HCO ₃ -CaMg	HCO ₃ SO ₄ -CaMg	HCO ₃ -CaMg
CY4-1 (Q)	HCO ₃ -NaCaMg	HCO ₃ -NaCaMg	HCO ₃ -NaCa
CY5 (Q)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa
CY6-1 (Q)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa
CY7 (Q)	HCO ₃ -Na	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCaMg
CY8 (Q)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -Na	HCO ₃ -NaCa
CY9 (Q)	HCO ₃ -Na	HCO ₃ Cl-NaCa	HCO ₃ Cl-CaMg
CY10 (Q)	HCO ₃ Cl-NaCa	HCO ₃ Cl-NaCa	HCO ₃ -NaCaMg
CY11 (Q)	HCO ₃ SO ₄ -CaMg	HCO ₃ Cl-NaCaMg	HCO ₃ Cl-NaCa
CY12 (Q)	HCO ₃ Cl-NaCaMg	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -CaMg
CY13 (Q)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ Cl-NaCa	HCO ₃ -NaCaMg
CY18 (Q)	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa	HCO ₃ -NaCa
CY21 (Q)	HCO ₃ -CaMg	HCO ₃ -NaCaMg	HCO ₃ -NaCa

注: (S) 表示深井, (Q) 表示浅井。

对照不同深度地下水化学类型变化,可以看到深层地下水化学类型变化较浅层的小,11 个点中有 5 个地段未发生变化,另外,深层地下水阴离子仅有 HCO₃⁻ 参与了水化学类型的划分,而浅层地下水中部分地段 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 所占比例较大。20 世纪 80 年代初,研究区地下水存在 4 类化学类型: HCO₃-CaMg、HCO₃-CaNaMg、HCO₃Cl-CaMg 和 HCO₃Cl-CaNaMg,其中以前两类为主^[12],和此次研究结果比较,朝阳区地下水化学类型发生了明显变化,此次研究中地下水化学类型最多的是 HCO₃-NaCa。

地下水水化学成分的形成和演变主要受流经岩 (土) 的种类、性质以及其他各种作用所控制^[13]。已有研究表明:燕山组分以花岗岩、片麻岩类为主,为潮白河冲洪积扇系统。在潮白河冲洪积扇剖面上,

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 浓度在剖面中部均开始大幅度升高,但总体而言, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量分数从剖面顶部到剖面边缘逐渐下降,而 Na^+ 浓度增加明显,阴离子 HCO_3^- 质量分数占绝对优势(80%以上),从剖面顶部至剖面边缘含量稍有下降,而 Cl^- 和 SO_4^{2-} 略有增加趋势,但 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量分数均在 11% 以下。西山组分以石灰岩类为主,为永定河冲洪积扇系统,从扇顶至扇前缘, Ca^{2+} 质量分数总体呈减少的趋势,而 Mg^{2+} 和 Na^+ 质量分数均呈增加趋势,其中 Na^+ 质量分数增加明显;阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 质量分数从剖面顶部至剖面前缘呈上升趋势, SO_4^{2-} 质量分数稍有下降^[14]。朝阳区西部为永定河冲洪积扇前缘,东北部除受永定河冲洪积影响外,还受到潮白河冲洪积的影响。因此,朝阳区地下水 HCO_3^- -NaCa 型较多。此外,在工农业区域附近,由于受人为活动的影响,浅层地下水受到污染, Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量分数明显升高,导致 HCO_3Cl 和 HCO_3SO_4 型地下水出现^[15]。根据 2007 朝阳区地下水水质评价报告,按照 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》,CY10、CY11 和 CY12 所在地段地下水已受人为污染,地下水中 Cl^- 含量较高,为 IV 类水^[16]。

根据以上朝阳区地下水化学类型,结合朝阳区地下水水流方向探讨地下水类型演化。朝阳区地下水总体流向为西南—东北,其中中部和东北部存在地下水降落漏斗,西半部分第四纪岩性相对较粗,地下水除易接受地表水或降水入渗补给,同时接受邻近边界地下水补给,从而导致西半部水化学类型年际间发生变化,如 2007—2009 年 CY1、CY3、CY9、CY12 和 CY13 等处水化学类型变化依次为 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCaMg $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -CaMg、 HCO_3^- -CaMg $\rightarrow\text{HCO}_3\text{SO}_4$ -CaMg $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -CaMg、 HCO_3^- -Na $\rightarrow\text{HCO}_3\text{Cl}$ -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3\text{Cl}$ -CaMg、 HCO_3Cl -NaCaMg $\rightarrow\text{HCO}_3\text{SO}_4$ -CaMg $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -CaMg 和 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3\text{Cl}$ -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCaMg;而在中部和东北部由于地下水降落漏斗的存在,水交替迅速,含水层中易溶组分如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 等不断被淋滤并由地下径流带走,形成低矿化度的 HCO_3^- -Na、 HCO_3^- -NaCa、 HCO_3^- -MgCa 型为主的地下水,且水化学类型较为稳定,如 2007—2009 年 CY4-2、CY5、CY6-1、CY8、CY20 和 CY22 等处,对应各年的地下水化学类型依次为 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa、 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa、 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa、 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa、 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -Na $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa、 HCO_3^- -NaCa $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -Na $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -NaCa 和 HCO_3^- -Na $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -Na $\rightarrow\text{HCO}_3^-$ -Na。总体上朝阳区西

半部地下水化学类型变化较快,漏斗区以低矿化度的水化学类型为主,其他部分地段由于受人类活动的影响,浅层地下水出现 HCO_3Cl 和 HCO_3SO_4 型。

4 结 论

北京市朝阳区地下水中阴离子以 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,其中 HCO_3^- 的含量最高,阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主。从各离子组分含量 3 a 的变异系数看,阴离子中 Cl^- 各年度的变异系数最大,是随环境因素而变化的敏感因子,而 HCO_3^- 的变异系数相对较小,其含量相对稳定;4 种阳离子中变异系数中 Ca^{2+} 年际间相对变化较小,而 Na^+ 的变化稍大。各离子组分在不同年份中丰水期和枯水期的含量变化不大,季节变化对离子组分影响较小。TDS 与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的相关系数达到 0.83 以上,其大小变化主要受 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 控制。总体上朝阳区地下水化学类型演化受地下水流场、岩性和人类活动的影响,西半部地下水化学类型变化较快,漏斗区以低矿化度的水化学类型为主,部分地段浅层地下水由于受工农业生产活动的影响,地下水出现 HCO_3Cl 和 HCO_3SO_4 型。

参考文献:

- [1] 刘锋,李延河,林建.北京永定河流域地下水氢氧同位素研究及环境意义[J].地球学报,2008,29(2):161-166.
- [2] 张安京,叶超,李宇,等.北京地下水[M].北京:中国大地出版社,2008:36-39.
- [3] 宋献方,李发东,于静洁,等.基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水循环特征[J].地理研究,2007,26(1):11-21.
- [4] 郑跃军,万利勤,李文鹏,等.北京平原周边基岩水和地表水的水化学及同位素分析[J].水文地质工程地质,2009(1):48-50.
- [5] 范畅,季宏兵,丁淮剑.城市化过程对北京周边河流水化学特征的影响[J].首都师范大学学报:自然科学版,2010,31(5):43-50.
- [6] 沈照理,朱宛华,钟佐桑.水文地球化学基础[M].北京:中国大地出版社,1993:101-114.
- [7] 章光新,邓伟,何岩,等.中国东北松嫩平原地下水水化学特征及演变规律[J].水科学进展,2006,17(1):20-28.
- [8] 刘立才,陈鸿汉,杨仪,等.苏锡常地区浅层地下水 $\gamma_{\text{Na}}/\gamma_{\text{Cl}}$ 特征及其成因初探[J].中国地质,2008,35(1):117-122.

(下转第 24 页)

一般在 150 之内,虽然阳宗海北岸施加咀和东岸黄水洞附近也有 R_i 相对较高的区域,但总体上还属轻微风险程度。只有位于谈葛营附近的 N03 取样点的潜在生态风险指数较高,达 160.06,属中等风险程度,低于滇池的潜在生态风险指数(R_i 介于 100 ~ 800)^[6],而较异龙湖的潜在生态风险指数略高^[7]。结合阳宗海表层沉积物中各重金属质量比与分布特征,分析其原因,认为主要是阳宗海 As 的潜在生态风险较大引起的。在 N03 取样点, E_r^{As} 对 R_i 指数的贡献量达 65%。而在 R_i 指数较高的 N01 取样点, E_r^{As} 的贡献量也达到 61%。因此 As 是阳宗海表层沉积物中最突出的生态风险因子。虽然 Cu 和 Cr 在阳宗海表层沉积物中的富集程度也较高,但因其生物毒性相对较低,因此不是主要的生态风险因子。

3 结 论

a. 阳宗海湖底表层沉积物中, Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Ni、Co、Pb、As 的质量比平均值依次为 9413.1 mg/kg、617.9 mg/kg、149.2 mg/kg、189.6 mg/kg、145.8 mg/kg、97.6 mg/kg、55.1 mg/kg、27.4 mg/kg、40.3 mg/kg、31.4 mg/kg。Zn、Cr、Pb、As 的分布特征具有较高的相关性,它们主要来自人类活动造成的污染。Ti、Mn、V、Cu、Ni、Co 的分布特征相似,以岩石风化等自然因素来源为主。

b. 阳宗海表层沉积物中重金属的富集程度按富集系数均值大小依次为 As、Cu、Cr、Co、Zn、Ni、V、Mn、Ti、Pb,其中, As、Cu、Cr 的富集程度相对较高。阳宗海重金属潜在生态风险指数一般在 150 之内,总体上属轻微风险程度。只有位于阳宗海南岸谈葛营附近区域的沉积物受 As 的影响,潜在生态风险达到了中等程度。重金属对阳宗海生态风险贡献程度由大到小依次为 As、Cu、Co、Ni、Pb、Cr、V、Zn、Mn、Ti,其中,As 产生的潜在生态风险较其他重金属明显偏高,是阳宗海最主要的生态风险因子。

为避免阳宗海湖泊环境继续恶化,应对阳宗海周边企业的排污加强监测管理,对阳宗海沉积物中的重金属进行治理,并通过宣传强化人们的环保意识。

参考文献:

[1] 唐阵武,程家丽,岳勇,等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学,2009,21(1):61-68.

[2] 焦伟,卢少勇,李光德,等. 滇池内湖滨带重金属污染及其生态风险评价[J]. 农业环境科学学报,2010,29(4):740-745.

[3] 孙照斌,邴海健,吴艳宏,等. 太湖流域西沭湖沉积岩芯

中重金属污染及潜在生态风险[J]. 湖泊科学,2009,21(4):563-569.

[4] 蒋庆丰,游珍,倪黎明,等. 南通市河流底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 水资源保护,2010,26(5):11-15.

[5] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[6] 焦伟,卢少勇,李光德,等. 滇池内湖滨带重金属污染及其生态风险评价[J]. 农业环境科学学报,2010,29(4):740-745.

[7] JUNHONG B, BAOSHAN C, BIN C, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China[J]. Ecological Modelling,2011,222(2):301-306.

[8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control:a sediment logical approach[J]. Water Research,1980,14(8):995-1001.

[9] 宁建凤,邹献中,杨少海,等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. 生态学报,2009,29(11):6059-6067.

[10] 王胜强,孙津生,丁辉. 海河沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境工程,2005,23(2):62-64.

[11] 徐争启,倪师军,虞先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-115.

(收稿日期:2011-07-07 编辑:彭桃英)

(上接第 12 页)

[9] 廖资生,林学钰. 松嫩盆地的地下水化学特征及水质变化规律[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2004,29(1):96-102.

[10] 陈小兵,周宏飞,张学仁,等. 新疆喀什噶尔冲积平原区地下水水化学特征[J]. 干旱区地理,2004,27(1):75-79.

[11] 张翼龙,王丽娟,王文中,等. 呼和浩特市浅层地下水水化学特征演变规律[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(6):14-17.

[12] 北京市朝阳区水务局. 北京市朝阳区水资源调查和水利区划报告[R]. 北京:北京市朝阳区水务局,1982.

[13] 孙芳强,候光才,窦妍,等. 鄂尔多斯盆地白垩系地下水循环特征的水化学证据:以查布水源地为 例[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,39(2):269-275.

[14] 谢振华,刘凯,李志萍,等. 基于沉积物物质来源的地下水水化学特征分析:以北京市平原区为例[J]. 地学前缘,2010,17(6):81-87.

[15] 王磊,章光新. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水文化学联系研究[J]. 湿地科学,2007,5(2):166-173.

[16] 张永祥,彭庆斌,朱亚雷,等. 2007 年北京市朝阳区地下水水质评价报告[R]. 北京市:北京市朝阳区水务局,2007.

(收稿日期:2011-09-22 编辑:徐 娟)