

## 北京平原区永定河地下水系统地下水化学和同位素特征

翟远征<sup>1,2)</sup>, 王金生<sup>1,2)</sup>, 滕彦国<sup>1,2)</sup>, 左 锐<sup>1,2)</sup>

1) 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

2) 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875

**摘 要:** 北京平原区永定河地下水系统位于北京市的西部。在该区采集了一个水文年的大气降水样, 并对其中的 D 和  $^{18}\text{O}$  组成了分析; 于旱季在该地下水系统中采集了大量地下水样, 并对其中的八大离子浓度、D 和  $^{18}\text{O}$  组成、Sr 浓度以及  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值作了分析。研究表明, 研究区地下水的水化学类型较为单一; 研究区地下水主要来源于大气降水入渗补给, 并且在补给过程中经历了不同程度的蒸发作用的影响; 地下水中的 Sr 和 Ca 元素经历了较为相似的水文地球化学过程; 地下水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值普遍较小且变幅也很小, 据此判断 Sr 均为碳酸盐岩来源。这些分析结果将为进一步识别研究区的地下水系统及地下水来源提供依据。  
**关键词:** 地下水系统; 水文地球化学; 水化学; 同位素; 锶

中图分类号: P641.3; P641.8 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.01.13

## Chemical and Isotopic Characteristics of Groundwater in the Yongding River Groundwater System of Beijing Plain

ZHAI Yuan-zheng<sup>1,2)</sup>, WANG Jin-sheng<sup>1,2)</sup>, TENG Yan-guo<sup>1,2)</sup>, ZUO Rui<sup>1,2)</sup>

1) College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2) Engineering Research Center for Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875

**Abstract:** The Yongding River groundwater system in Beijing plain is located in western Beijing. Precipitation samples of a hydrological year in Beijing plain were collected, and D and  $^{18}\text{O}$  components of these samples were analyzed. A set of groundwater samples in the Yongding River groundwater system were also collected during the arid season, and components of eight ions, D and  $^{18}\text{O}$ , concentrations of Sr, and ratios of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of these samples were analyzed. On such a basis, some conclusions have been reached: the hydrochemical types of groundwater in the study area are comparatively simple; the groundwater in the study area is derived mainly from infiltration of local precipitation, and is affected by different degrees of evaporation during the process; Sr and Ca elements in groundwater share a similar hydrogeochemical process; values and variation range of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios are small, which implies that Sr element in groundwater comes from carbonate rock. The results obtained by the authors will provide a practical basis for further understanding the groundwater system of the study area and the water sources.

**Key words:** groundwater system; hydrogeochemistry; aqueous chemistry; isotope; strontium

北京地区属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候区, 多年(1949-2008 年)平均降水量约 600 mm。北京地区降水时空分布的高度不均性(尤其是时间分布上, 70%以上的降水集中在 7 月下旬到 8 月上旬

短短的 20 天内(宋献方等, 2007)), 导致降水中的大部分并没有转化为水资源。从人均占有量来看, 北京人均水资源占有量仅为全国的 1/8, 世界的 1/30, 属于十分缺水的城市。整个北京的农业、工业和生

本文由北京市重大科技项目编号: D07050601510000)资助。

收稿日期: 2010-06-05; 改回日期: 2010-09-13。责任编辑: 魏建军。

第一作者简介: 翟远征, 男, 1983 年生。在读博士。主要从事同位素水文地质学方面的研究。通讯地址: 100875, 北京师范大学水科学研究院。E-mail: diszyz@163.com。

活用水主要靠地表水和地下水供给,其中地表水供给主要来自密云水库,地下水供给主要来自全市几个大的地下水集中供水水源地,且后者长期占据主导地位(常年占供水比重的 2/3 左右)(北京水务局, 2009)。

流经北京地区的最大河流——永定河,在历史上频繁改道,是海河流域历史上最不稳定的河流。目前的河道斜穿平原区西部,过丰台区卢沟桥后形成地上河,最后在大兴出境(图 1)。其上游流经土质松软的黄土高原,携沙量大(素有“小黄河”之称),进入平原后泥沙大量沉积,在北京平原区的形成中起着十分重要的作用,北京城就坐落在永定河冲洪积扇上。

根据第四系地层的沉积特征,以及地下水系统的演化特征,北京地区的地下水被前人划分成几个大的系统,其中由永定河的冲洪积作用在平原区形成的地下水系统被称为北京平原区永定河地下水系统(北京地质矿产勘查开发局等, 2008)(简称“永定河地下水系统”),其范围如图 1 所示。永定河地下水系统东西和南北跨度分别约为 65 km 和 72 km,面积约为 2500 km<sup>2</sup>,在北京市地下水供水中长期居于主要地位。因此,该地下水系统中地下水资源的合理开发利用,对整个北京的社会经济发展都起着极为重要的作用。20 世纪 60 年代以来,地质和水文地质部门曾对北京地区的地下水资源和环境演化做过很多研究工作,且已基本上掌握了地下水的分布规律。但是,将地下水作为整个流域水循环的一部分,从流域水循环角度研究地下水的工作十分欠缺(宋

献方等, 2007),而且将北京地区的地下水划分成若干个系统进行深入研究,更是近几年才有的事。同时,由于全球气候条件的变化,北京地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一些重大变化,如降水量相对减少、连续多年偏旱、极端天气频现、地表水体大幅减少、地下水位持续下降和一些井泉干涸等。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。重新判定区域地下水的演化规律和来源十分必要。

水化学和同位素是刻画水循环及地下水补给关系的先进方法(马金珠等, 2007; 叶萍等, 2008; 杜虎林等, 2008; Bouchaou et al., 2008; Edmunds, 2009),通过分析地下水的水化学和同位素特征,可揭示地下水的组成及来源(徐步台等, 1999; 叶思源等, 2002; 黄冠星等, 2007; Ian et al., 2007; Edmunds, 2009; Matthias et al., 2009)。该法在国内外已有较广泛的应用(陈建生等, 2003; 张光辉等, 2006; 张应华等, 2007; 郭永海等, 2008; Edmunds, 2009; 杨丽芝等, 2009; 滕彦国等, 2010)。张宗祜等(2001)、Tang et al. (2003)和 Chen et al. (2004)曾分别对华北平原北京以南的地下水环境的演化作过研究;宋献方等(2007)曾对北京东北部的地下水循环特征作过研究;刘锋等(2008)对永定河流域地下水的研究主要集中在沿河近岸,与本次研究区域差别较大。因此,综合来看,目前针对永定河地下水系统的深入研究比较缺乏,而联合水化学、氢氧稳定同位素和 Sr 同位素等技术对其进行研究的,则尚未见报道。

本研究通过现场调查和采集大气降水样和地下水样,并对所采水样的八大离子、D、<sup>18</sup>O、Sr 含量和 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值等进行了定量测试分析,查明了研究区地下水系统中地下水的水化学和同位素特征,并揭示了地下水在变化环境下的更新演化规律,为当地地下水资源的合理开发利用提供科学依据。

## 1 采样和分析

### 1.1 采样

本次研究中,沿该研究区的山前一扇中一扇缘布设了采样点(图 1),以保证所采地下水样组在整个研究区具有较好的代表性。按各测试项目的采样要求,于 2008 年 7 月至 2009 年 6 月采集了大气降水样,于 2009 年 6 月上旬(旱季)采集了地下水样(37 组)。地下水样均来自饮用水井和农灌用井,且采样前均先抽水 3~10 分钟。在现场用 GPS 对采样点进

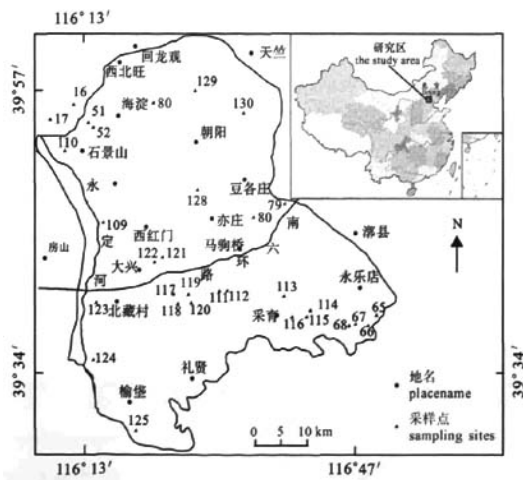


图 1 研究区位置和采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling sites

行定位(经纬度、井口高程), 并对水样的温度、pH 值、TDS(总溶解固体)、EC(电导率)和 ORP(氧化还原电位)等进行检测。

采样前, 所有采样瓶(高密度聚乙烯瓶)均用 pH 值为 2 的 HCl 溶液浸泡 2~3 天, 然后用蒸馏水冲洗干净, 并且在采样前用样品水冲洗 3 次。采样后, 在现场马上将装样瓶用高质量封口膜密封。

不同样品采集步骤如下:

(1)八大离子、D 和  $^{18}\text{O}$  测试水样用常规采样方法采集, 取样量分别为 1000 ml、200 ml 和 200 ml。

(2)Sr 含量和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值测试水样在采集前先用 0.45  $\mu\text{m}$  的过滤膜进行过滤, 然后加 HCl 酸化至 pH 值为 2 左右, 采样量均为 200 ml。

1.2 分析

大气降水样的测试项目包括 D(含量用  $\delta\text{D}$  表示, 下同)和  $^{18}\text{O}$ (含量用  $\delta^{18}\text{O}$  表示, 下同), 地下水样的测试项目包括八大离子(各离子浓度均用  $\text{mg/L}$  表示, 下同)、D 和  $^{18}\text{O}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  浓度(用  $[\text{Sr}^{2+}]$  表示, 单位  $\text{mg/L}$ , 下同), 以及  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值(用小数表示, 无量纲, 下同), 其中:

(1)水中八大离子组分的测定由北京师范大学分析测试中心完成。其中  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  的测试方法为火焰原子吸收分光光度法(GFU-202);  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的测试方法为 EDTA 滴定法;  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的测试方法为离子色谱法(HLC-601);  $\text{HCO}_3^-$  的测试方法为酸碱

滴定法。

(2)D 和  $^{18}\text{O}$  含量的测定由中国地质科学院矿产资源研究所完成。其中,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  比值和 D/H 比值分别由  $\text{CO}_2$  平衡方法和锌还原法制备后, 通过 FinniganMAT251 同位素质谱仪测定, 并以  $\delta$  值表示,  $\delta\text{D}$  值和  $\delta^{18}\text{O}$  值的精度分别为  $\pm 1.0\text{‰}$  和  $\pm 0.1\text{‰}$ 。

(3) $\text{Sr}^{2+}$  浓度用 ICP-MS 测定, 由美国德州大学阿灵顿分校(University of Texas at Arlington, USA)完成。

(4) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值用 MAT262 测定, 由中国地质科学院矿产资源研究所完成。

测试项目统计信息见表 1。

2 结果和讨论

2.1 地下水化学特征及其指示意义

离子间的相关性分析可揭示地下水水化学参数的相似相异性及来源的一致性和差异性(章光新等, 2006)。本次研究所采地下水样中 TDS 及各离子间的相关系数见表 2。

从整个研究区来看: 2009 年枯水期浅层地下水中的  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Na}^+$  与 TDS 之间的相关性较高, 而其它如  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  等与 TDS 之间的相关性很低, 这主要缘于浅层地下水子系统的性质(章光新等, 2006)和外部环境的区域差别较大。地下水中 TDS 的均值为 739  $\text{mg/L}$ , 大于 600  $\text{mg/L}$ , 在水-岩相互作用过程中有方解石( $\text{CaCO}_3$ )和白云石( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

表 1 地下水样测试项目统计信息(各项浓度单位同前)

Table 1 Statistic information of tested items of groundwater samples (the unit of each item has been explained before)							
测试项目	TDS	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$
测值范围	24~2304	0.01~6.44	4.16~375.00	19.6~187.00	0.50~158.00	12.20~518.70	4.30~340.00
均值	739	1.43	82.33	78.36	42.24	357.82	79.12
测试项目	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\delta\text{D}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\text{Sr}^{2+}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
测值范围	0.05~128.00	1.40~833.30	-88~-47	-11.9~-5.0	0.359~0.907	0.708696~0.711004	
均值	19.23	114.94	-67.83	-9.0	0.66	0.709675	

表 2 地下水样中 TDS 及各离子浓度值(mg/L)间的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients of TDS and concentrations of ions of groundwater samples

项目	TDS	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
TDS	1								
$\text{K}^+$	0.051	1							
$\text{Na}^+$	<b>0.739</b>	0.005	1						
$\text{Ca}^{2+}$	0.458	0.244	0.061	1					
$\text{Mg}^{2+}$	<b>0.903</b>	0.013	0.627	0.345	1				
$\text{HCO}_3^-$	0.405	0.010	0.163	0.228	0.402	1			
$\text{Cl}^-$	<b>0.838</b>	0.156	0.640	0.493	0.688	0.115	1		
$\text{SO}_4^{2-}$	<b>0.773</b>	0.022	<b>0.815</b>	0.167	<b>0.750</b>	0.075	<b>0.738</b>	1	
$\text{NO}_3^-$	0.162	0.359	0.004	0.659	0.076	0.025	0.288	0.024	1

沉淀生成,而且存在着离子交换,因此,地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  的相关性很低。由于水样的矿化度属于中等水平,因此,其中的  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量均较高,且两者呈很好的相关关系。

TDS 和各离子浓度的变化范围均很大(表 1),如 TDS 的最大值是最小值的 96 倍,这与各地下水样的赋存环境以及水-岩相互作用的程度有密切关系,进而表明这些地下水与大气降水之间联系的密切程度也各有不同。

从水化学类型上看,研究区内地下水的水化学类型比较单一,大部分水样中的阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  为主,  $\text{Mg}^{2+}$  为次,只有很少一部分以  $\text{Mg}^{2+}$  或  $\text{Na}^{2+}$  为主,其中  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Na}^{2+}$  与地下水中的 TDS 呈很好的线性相关性;阴离子则以  $\text{HCO}_3^-$  占绝对优势,  $\text{SO}_4^{2-}$  或  $\text{Cl}^-$  占次要位置,但后两者与地下水中 TDS 的相关性远高于前者;在所有水样中,阳离子均以  $\text{K}^+$  的含量最小,阴离子均以  $\text{NO}_3^-$  的含量最小,且两者与 TDS 之间均不存在明显的线性相关关系(表 2)。

## 2.2 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值及其指示意义

基于本次测试数据得到的研究区大气降水线方程为  $\delta\text{D}=6.931\delta^{18}\text{O}+3.927(\text{‰})$ ,  $R^2=0.849$ ,  $n=27$ (图 2)。降水的  $\delta\text{D}$  值介于  $-15\text{‰}$ ~ $-75\text{‰}$  之间,平均值为  $-38.4\text{‰}$ ,最大值是最小值的 5 倍;  $\delta^{18}\text{O}$  值介于  $-2.3\text{‰}$ ~ $-10.4\text{‰}$  之间,平均值为  $-5.1\text{‰}$ ,最大值是最小值的 4.5 倍,表明两者的变化幅度比较一致。

地下水中的  $\delta\text{D}$  值和  $\delta^{18}\text{O}$  值及两者之间的关系呈现几个特征,(1)两者的变化幅度均比大气降水的相应值小(表 1);(2)两者的均值均比大气降水的相应值小得多(图 2);(3)两者之间显示出良好的线性关系,但是斜率远小于大气降水线(图 2);(4)表示地下水的点都分布在当地降水线附近,并稍微靠近右下角;(5)表示地下水的点大部分密集地分布在地下水均值的

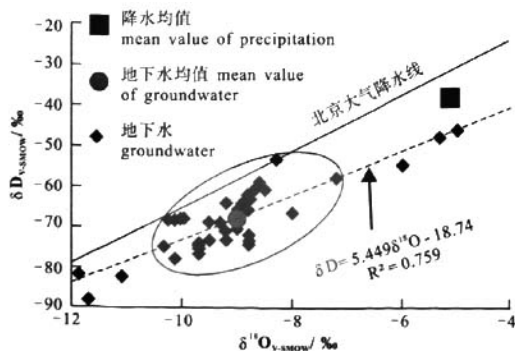


图 2 地下水中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值之间的关系

Fig. 2 Relationship between  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in groundwater

周围(图 2 圈闭曲线包围部分)。

以上特征表明,(1)地下水主要来源于大气降水的入渗补给;(2)大气降水在补给地下水过程中,经历了比较明显的蒸发过程,反映了研究区属气候比较干燥的蒸发盆地的特征。

## 2.3 $[\text{Ca}^{2+}]$ 、 $[\text{Sr}^{2+}]$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值之间的关系及指示意义

地下水、海洋水、陆地水和大气水等水体都是 Sr 的源汇项,地下水中的 Sr 受地下水补给源和含水介质的共同影响(Janina et al., 2007)。大气降水中携带的 Sr 含量通常很低,与地下水中 Sr 的含量相比可以忽略,所以地下水中 Sr 的含量极大程度上取决于地下水与含水介质的水-岩相互作用情况。因此,地下水中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的比值基本反映了含水介质中 Sr 的同位素特征(Shand et al., 2009),其比值的不同通常被认为是由地下水与含水介质之间的水-岩相互作用或混合作用引起的。基于以上理论, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值常用于研究地下水-岩相互作用和地下水混合过程(Shand et al., 2009)。

### 2.3.1 $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{Sr}^{2+}]$ 比值及其指示意义

地下水样中 Ca 的浓度介于 19.6~187.0 mg/L 之间,最大值是最小值的 9 倍多,平均值为 78.36 mg/L,表明研究区地下水中 Ca 浓度的区域差异很大,这跟区内碳酸盐岩成片分布有很大关系。

Sr 在水中是一种比较容易迁移的元素, Sr 在水中的富集既取决于含水介质中 Sr 的含量,也取决于水-岩相互作用的程度(Shand, 2009)。水样中 Sr 的浓度介于 0.359~0.907 mg/L 之间,最大值是最小值的 2.5 倍,平均值为 0.66 mg/L,比研究区大气降水中 Sr 的平均含量(0.023 mg/L)高得多,表明地下水中的 Sr 主要源于含水介质,而岩石矿物的区域性分布不均和水-岩作用程度的不同是导致水样中 Sr 含量差异的两大原因。

由以上分析可见,相较于 Ca,地下水中 Sr 浓度的变幅要小得多,且两者大体上呈正相关关系(图 3),这表明降水补给进入含水层后,水中的 Sr 和 Ca 经历了大致相似的水文地球化学作用。这些特征为利用 Ca 和 Sr 元素示踪地下水-岩相互作用提供方便,进而可为揭示地下水更新演化规律提供依据。

### 2.3.2 $[\text{Sr}^{2+}]$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的指示意义

地下水中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值与地下水赋存介质有着十分密切的关系,而且比值的变化通常比 Sr 浓度本身的变化要小(Janina et al., 2007)。从测试结果看,地下水中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值变幅十分小(0.708696~0.711004),而且大致处在碳酸盐岩风化来源的

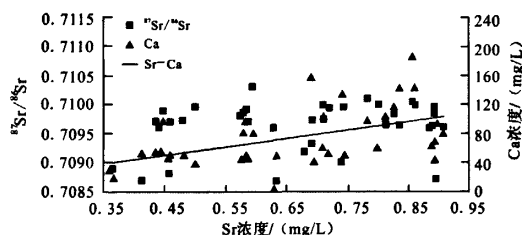


图3 地下水中 Sr 浓度与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值和 Ca 浓度之间的关系

Fig. 3 Relations of concentrations of Sr to  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and concentrations of Ca

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值范围(0.708~0.709)内,与硅酸盐岩风化来源的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值范围(0.716~0.720)相去甚远。由此可知,研究区地下水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值主要受到当地含水介质(以碳酸盐岩风化层为主)的影响,进而可以推知,研究区内地下水的主要补给来源为大气降水的垂向入渗。

### 3 结论

经对研究结果的充分分析和讨论,得到以下结论:

(1)从水化学类型上看,北京平原区永定河地下水系统中的地下水的水化学类型比较单一,大部分水样中的阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  为主,  $\text{Mg}^{2+}$  为次,只有很少一部分以  $\text{Mg}^{2+}$  或  $\text{Na}^{+}$  为主,阴离子则以  $\text{HCO}_3^{-}$  占绝对优势,  $\text{SO}_4^{2-}$  或  $\text{Cl}^{-}$  占次要位置。

(2)北京平原区永定河地下水系统中的地下水主要来源于大气降水的入渗补给,大气降水在补给地下水过程中,经历了比较明显的蒸发过程,反映了研究区属气候比较干燥的蒸发盆地的特征。

(3)北京平原区永定河地下水系统中的地下水中的  $\text{Sr}^{2+}$  浓度和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值变幅都较小,其中  $\text{Sr}^{2+}$  浓度和  $\text{Ca}^{2+}$  浓度之间大致存在线性关系,反映了 Sr 和 Ca 元素水文地球化学方面的一致性,为进一步研究水-岩相互作用提供方便。地下水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值普遍较小且变幅也很小,据此判断 Sr 均为碳酸盐岩来源。

### 参考文献:

- 北京地质矿产勘查开发局,北京水文地质工程地质大队. 2008. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社: 35-46.
- 北京水务局. 2009. 北京水资源公报[EB/OL]. [2010-08-18] <http://www.bjwater.gov.cn/tabid/207/Default.aspx>.
- 陈建生, 凡哲超, 汪集扬, 顾恩祖, 赵霞. 2003. 巴丹吉林沙漠湖泊及其下游地下水同位素分析[J]. 地球学报, 24(6): 497-504.
- 杜虎林, 肖洪浪, 郑威, 周宏伟, 孙书澎, 高前兆, 邱永志, 许波,

- 汪祥余. 2008. 塔里木沙漠油田南部区域地表水与地下水水化学特征[J]. 中国沙漠, 28(2): 388-394.
- 郭永海, 王驹, 萧丰, 王志明, 刘淑芬, 苏锐, 宗自华. 2008. 高放废物处置库北山预选区地下水同位素组成特征及其意义[J]. 地球学报, 29(6): 735-739.
- 黄冠星, 孙继朝, 齐继祥, 臧逸中, 陈京生, 荆继红. 2007. 鄂尔多斯地下水同位素组成与气候变化关系[J]. 地球学报, 28(6): 550-554.
- 刘锋, 李延河, 林建. 2008. 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, 29(2): 161-166.
- 马金珠, 黄天明, 丁贞玉, EDMUNDS W M. 2007. 同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源[J]. 地球科学进展, 22(9): 922-930.
- 宋献方, 李发东, 于静洁, 唐常源, 杨聪, 刘相超, 佐仓保夫, 近藤昭彦. 2007. 基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水水循环特征[J]. 地理研究, 26(1): 1-21.
- 滕彦国, 左锐, 王金生, 林学钰. 2010. 区域地下水演化的地球化学研究进展[J]. 水科学进展, 21(1): 127-136.
- 徐步台, 章秋芳, 周树根. 1999. 浙江武义盆地地热水同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 20(4): 357-362.
- 杨丽芝, 张光辉, 刘中业, 刘春华. 2009. 鲁北平原地下水同位素年龄及可更新能力评价[J]. 地球学报, 30(2): 235-242.
- 叶萍, 金勤胜, 周爱国, 刘存富, 蔡鹤生, 甘义群. 2008. 河北平原地下水锶同位素形成机理[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 33(1): 137-144.
- 叶思源, 孙继朝, 姜春永. 2002. 水文地球化学研究现状与进展[J]. 地球学报, 23(5): 477-482.
- 张光辉, 陈宗宇, 聂振龙, 刘少玉, 张翠云, 申建梅, 王金哲, 程旭学, 张荷生. 2006. 黑河流域地下水同位素特征及其对气候变化的响应[J]. 地球学报, 27(4): 341-348.
- 张应华, 仵彦卿. 2007. 黑河流域不同水体中  $\delta^{18}\text{O}$  的变化[J]. 水科学进展, 18(6): 864-870.
- 张宗祜, 沈照理, 薛禹群, 任福弘, 施德鸿, 殷正雷, 钟佐桑, 孙星和. 2001. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社: 1-281.
- 章光新, 邓伟, 何岩, SALAMA R. 2006. 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, 17(1): 20-28.

### References:

- BOUCHAO L, MICHELOT J L, VENGOSH A, HSISSOU Y, QURTOBI M, GAYE C B, BULLEN T D, ZUPPI G M. 2008. Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco[J]. Journal of Hydrology, 352: 267-287.
- CHEN J Y, TANG C Y, SAKURA S. 2004. Spatial geochemical and isotopic characteristics associated with groundwater flow in the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 18(16): 3133-3146.
- CHEN Jian-sheng, FAN Zhe-chao, WANG Ji-yang, GU Wei-zu, ZHAO Xia. 2003. Isotope Methods for Studying the Replenishment of the Lakes and Downstream Groundwater in the Badain Jaran Desert[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(6): 497-504(in Chinese with English abstract).

- DU Hu-lin, XIAO Hong-lang, ZHENG Wei, ZHOU Hong-wei, SUN Shu-peng, GAO Qian-zhao, QIU Yong-zhi, XU Bo, WANG Xiang-yu. 2008. Chemical Characteristics of Surface Water and Groundwater in South of Tarim Desert Oilfield[J]. *Journal Of Desert Research*, 28(2): 388-394(in Chinese with English abstract).
- EDMUNDS W M. 2009. Geochemistry's vital contribution to solving water resource problems[J]. *Applied Geochemistry*, 24: 1058-1073.
- Geological Mineral Authority of Beijing, Unit of Hydrogeology, Engineering Geology Of Beijing. 2008. Groundwater of Beijing[M]. Beijing: China Land Press: 35-46(in Chinese).
- GUO Yong-hai, WANG Ju, XIAO Feng, WANG Zhi-ming, LIU Shu-fen, SU Rui, ZONG Zi-hua. 2008. Groundwater Isotope Characteristics of the Pre-selected Site of a High Level Radioactive Waste Repository in the Beishan Area, Gansu Province and Their Implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(6): 735-739(in Chinese with English abstract).
- HUANG Guan-xing, SUN Ji-chao, QI Ji-xiang, ZANG Yi-zhong, CHEN Jing-sheng, JING Ji-hong. 2007. The Relationship between Groundwater Isotopic Composition and Climate Change in Ordos[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(6): 550-554(in Chinese with English abstract).
- IAN C, TAMIE W, BEN P. 2007. Controls on  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of groundwater in silicate-dominated aquifers: SE Murray Basin, Australia[J]. *Chemical Geology*, 246: 107-123.
- JANINA S K, BENT T H, SOMKID B. 2007.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio: a natural tracer to monitor groundwater flow paths during artificial recharge in the Bangkok area, Thailand[J]. *Hydrogeology Journal*, 15: 745-758.
- LIU Feng, LI Yan-he, LIN Jian. 2008. Hydrogen and Oxygen Isotope Study of Groundwater in the Yongding River Drainage of Beijing and Its Environmental Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(2): 161-166(in Chinese with English abstract).
- MA Jin-zhu, HUANG Tian-ming, DING Zhen-yu, EDMUNDS W M. 2007. Environmental Isotopes as the Indicators of the Groundwater Recharge in the South Badain Jaran Desert[J]. *Advances in Earth Science*, 22(9): 922-930(in Chinese with English abstract).
- MATTHIAS R, JOHN A W, DARREN A B. 2009. Strontium isotopes as tracers to delineate aquifer interactions and the influence of rainfall in the basalt plains of southeastern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 367: 188-199.
- SHAND P, DARBYSHIRE P F, LOVE A J, EDMUNDS W M. 2009. Sr isotopes in natural waters: Applications to source characterization and water-rock interaction in contrasting landscapes[J]. *Applied Chemistry*, 24: 574-586.
- SONG Xian-fang, LI Fa-dong, YU Jing-jie, TANG Chang-yuan, YANG Cong, LIU Xiang-chao, YASUO S, AKIHIKO K. 2007. Characteristics of groundwater cycle using deuterium, oxygen-18 and hydrochemistry in Chaobai River Basin[J]. *Geographical Research*, 26(1): 1-21(in Chinese with English abstract).
- TANG C Y, CHEN J Y, SHEN Y J. 2003. Long term effect of wastewater irrigation on nitrate in groundwater in the North China Plain[J]. *IAHS Pub*, 285: 34-40.
- TENG Yan-guo, ZUO Rui, WANG Jin-sheng, LIN Xue-yu. 2010. Progress in geochemistry of regional groundwater evolution[J]. *Advances in Water Science*, 21(1): 127-136(in Chinese with English abstract).
- Water Authority Of Beijing City. 2009. Bulletin of Water resources of Beijing[EB/OL]. [2010-05-18] <http://www.bjwater.gov.cn/tabid/207/Default.aspx>(in Chinese).
- XU Bu-tai, ZHANG Qiu-fang, ZHOU Shu-gen. 1999. Isotopic Geochemistry of Geothermal Water in Wuyi Basin, Zhejiang Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 20(4): 357-362(in Chinese with English abstract).
- YANG Li-zhi, ZHANG Guang-hui, LIU Zhong-ye, LIU Chun-hua. 2009. Isotope Age of Groundwater in Lubei Plain and an Evaluation of Its Renewable Capacity[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(2): 235-242(in Chinese with English abstract).
- YE Ping, JIN Qin-sheng, ZHOU Ai-guo, LIU Cun-fu, CAI He-sheng, GAN Yi-qun. 2008. Formation Mechanism of Sr Isotopes in Groundwater of Hebei Plain[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 137-144(in Chinese with English abstract).
- YE Si-yuan, SUN Ji-chao, JIANG Chun-yong. 2002. Current Situation and Advances in Hydrogeochemical Researches[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 23(5): 477-482(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-hui, CHEN Zong-yu, NIE Zhen-long, LIU Shao-yu, ZHANG Cui-yun, SHEN Jian-mei, WANG Jin-zhe, CHENG Xu-xue, ZHANG He-sheng. 2006. Isotopic Characteristics of Groundwater and Its Response to Paleoclimatic Variation in Heihe River Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(4): 341-348(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-xin, DENG Wei, HE Yan, SALAMA R. 2006. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China[J]. *Advances in Water Science*, 17(1): 20-28(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ying-hua, WU Yan-qing. 2007. Variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in water in Heihe river basin[J]. *Advances in Water Science*, 18(6): 864-870(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zong-hu, SHEN Zhao-li, XUE Yu-qun, REN Fu-hong, SHI De-hong, YIN Zheng-zhou, ZHONG Zuo-shen, SUN Xing-he. 2001. The evolution of groundwater in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-281(in Chinese).