

# 用环境同位素论区域地下水资源属性

文冬光

(中国地质调查局,北京 100083)

**摘要:** 从可持续角度提出了区域地下水资源属性的概念;分析了含水层系统中地下水质点的时间效应;利用大量同位素资料分析了不同区域含水层系统中的地下水资源属性和人类活动对地下水资源属性的影响. 指出利用环境同位素是研究区域地下水资源属性最直接、有效的方法;正确认识评价区域地下水资源属性对实现地下水资源可持续性具有重要意义.

**关键词:** 区域地下水资源属性;环境同位素;地下水年龄;含水层系统.

中图分类号: P641.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)02-0141-07

**作者简介:** 文冬光(1964—),男,研究员,1995年毕业于中国地质大学(北京),获博士学位,现从事水文地质环境地质调查管理工作. E-mail: wdongguang@mail.cgs.gov.cn

地下水资源是人类十分宝贵的战略资源,尤其在干旱和半干旱地区. 随着人口的大量增长和社会、经济的快速发展,伴随着地下水资源的大量开发,地下水资源的开发一方面满足了人民对水资源的需求,促进了社会经济的发展;另一方面,由于对地下水资源的性质认识不够,盲目、过量开发地下水,导致有些地区环境恶化,甚至局部地方出现地下水资源枯竭,结果引起人们害怕开采地下水. 要解决这些问题,首先要加强对地下水资源属性的认识. 本文根据国内外同位素水文学的最近研究成果,从可持续性角度,对区域地下水资源的属性进行了初步探讨.

## 1 区域地下水资源属性的理论基础

### 1.1 地下水资源属性的含义

区域地下水资源属性指的是在一定时间尺度上,地下水资源的更新程度或可恢复性. 地下水资源属性是针对人类生存发展的一个相对概念,它体现了资源的可持续性观点. 一般认为,能在几十年内更新的地下水,说明与现代地表水或大气降雨有密切联系,这种地下水更新快,可恢复性强;上百年更新的地下水,与现代地表水或大气降雨有一定联系,这种地下水更新较慢,有一定的可恢复性;上千年更新

的地下水,说明与现代地表水或大气降雨没有直接联系,这种地下水更新非常缓慢,可恢复性差;而更新时间上万年的地下水,可以认为与现代地表水或大气降雨没有联系,这种地下水相对人类活动而言是不可更新和恢复的. 因此,地下水资源属性是区域地下水补给、径流、排泄条件的综合体现.

区域地下水资源属性可以用地下水在含水层中的驻留时间(residence time)、或运移时间(travel time of groundwater through an aquifer)、或更新时间(turn over time)、或年龄(age)来度量. 一般可以根据水文地质条件和含水层特征来计算区域地下水运移速度,或通过测试地下水同位素组成来计算水质点的运移速度,来评价其资源属性.

### 1.2 地下水运移模型

含水层可分为潜水含水层和承压含水层. 对于简单含水层系统,已经推导出地下水年龄和流速随深度和距离变化的简单表示式<sup>[1,2]</sup>.

考虑一条穿过理想潜水含水层的二维剖面,假设含水层为等厚( $H$ )、均质(空隙度为 $\epsilon$ ),并接受均匀补给( $R$ ),见图 1a. 如果水平流速不随深度变化,则可以推导出该潜水含水层中地下水的流速和年龄函数:

$$\text{水平流速: } V_x = \frac{Rx}{H\epsilon}, \text{ 垂向流速: } V_z = \frac{(H-z)R}{H\epsilon},$$

$$\text{年龄函数: } t = \frac{H\epsilon}{R} \ln\left(\frac{H}{H-z}\right).$$

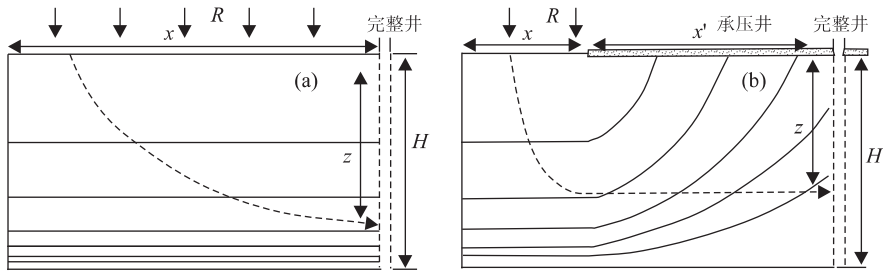


图 1 理想含水层中地下水年龄分布示意图

Fig. 1 Sketch map of groundwater age in an ideal aquifer

a. 潜水含水层; b. 承压含水层. 实线为等年龄线, 虚线为地下水流线. 据 Cook 等<sup>[2]</sup>改编

其中,  $x$  以左侧端点为起点(地下水分水岭), 向右侧增大;  $z$  为某地下水流线埋深.

可以看出, 地下水水平流速是  $x$  (离分水岭距离) 的线性函数, 在分水岭处为零, 在下游  $x$  处为  $Rx/H\epsilon$ ; 而地下水垂向流速是随埋深增加而降低, 介于  $R/\epsilon \sim 0$ , 地面为  $R/\epsilon$ , 含水层基底为 0. 地下水年龄是埋深的函数, 与含水层内的水平位置无关.

对于承压含水层, 假设含水层为等厚 ( $H$ )、均质 (空隙度为  $\epsilon$ ), 在含水层露头区 ( $x$ ) 接受均匀补给 ( $R$ ), 见图 1b. 如果水平流速不随深度变化, 则可以推导出该承压含水层中地下水的流速和年龄函数:

$$\text{水平流速: } V_x = \frac{Rx}{H\epsilon}, \text{ 垂向流速为 } 0,$$

$$\text{年龄函数: } t = \frac{H\epsilon}{R} \ln\left(\frac{H}{H-z}\right) + \frac{x'H\epsilon}{Rx}.$$

其中:  $x$  为补给区的长度;  $x'$  为承压区长度;  $z$  为某地下水流线埋深.

可见, 地下水水平流速与补给率和补给区长度成正比, 与含水层厚度和孔隙度成反比. 地下水年龄既是埋深的函数, 也与含水层补给区长度和承压区的长度相关.

Cook 等<sup>[2]</sup>还计算了上述两个简单含水层系统中地下水的平均驻留时间 ( $\tau$ ), 对于图 1a 所示条件,

$$\tau = \frac{H\epsilon}{R}; \text{ 对于图 1b 所示条件, } \tau = \frac{H\epsilon(x+x')}{Rx}.$$

如果我们取含水层厚度为 50 m, 孔隙度为 0.3, 补给强度为 200 mm/a, 则地下水在图 1a 所示的潜水含水层中的平均驻留时间是 75 a, 也就是说该含水层平均 75 a 才能完全更新一次. 对于图 1b 所示的条件, 如果补给区长度取 5 000 m, 承压区长度也是 5 km, 其他条件同图 1a, 则地下水在该承压含水层系统中的平均驻留时间是 150 a, 即含水层系统的平均更新时间为 150 a. 可见, 在其他条件相同下, 承

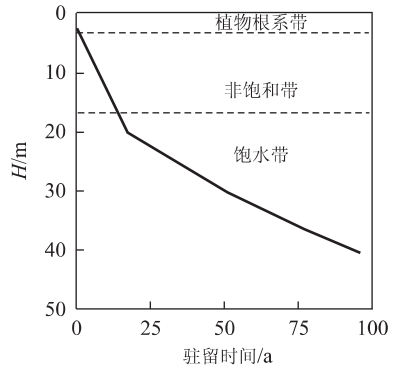


图 2 地下水驻留时间剖面

Fig. 2 Residence time curve of groundwater

根系带厚 3 m, 非饱和带埋深 20 m, 含水层厚度 50 m, 包气带含水率为 0.1, 孔隙度为 0.3, 年降雨 500 mm, 年补给 100 mm

压含水层系统比潜水含水层系统更新一次所需的时间要长, 并且, 承压区路径越长, 地下水更新所需时间也越长.

一般地, 我们说地下水在地下的驻留时间要包括地下水在植物根系带、植物根系带之下的非饱和带、饱水带驻留时间之和. 植物根系带的埋深和分布、非饱和带的厚度和含水率、饱水带的厚度和孔隙度、垂向上水的补给量等均影响地下水的驻留时间. Cook 等<sup>[2]</sup>绘制了地下水从植物根系带 → 非饱和带 → 饱水带的运移时间剖面, 见图 2.

通过以上分析, 我们可以清楚地建立起地下水水质点从大气降雨入渗开始, 通过地表植物根系带、包气带, 进入含水层运移整个全过程的时间概念, 这有助于理解区域含水层系统中地下水的运移时间分布. 这说明任何含水层系统中的地下水都具有时间概念, 由于一定的含水层系统具有特定的水文地质条件, 导致地下水在该含水层系统中具有相应的驻留时间, 当然, 系统中的地下水也具有相应更新周期. 这是研究地下水资源属性的理论基础.

## 2 用环境同位素评价区域地下水资源属性

最近,许多研究者发现可以利用地下水同位素(包括水本身的氢、氧同位素,和所溶解组分的同位素)组成来研究地下水的形成条件、补给和运移<sup>[3~5]</sup>,进而分析区域含水层系统中地下水运移的时间尺度和资源的可恢复性,这为定量评价区域地下水资源属性提供了非常直观的科学依据。

### 2.1 从稳定同位素组成看区域地下水资源属性

地下水稳定同位素组成很多,但目前研究最多的主要是 D, <sup>18</sup>O。由于大气降雨的  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  与当地年平均空气温度有明显的相关关系。据研究得出:温度每降低 1 °C,  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  相应减少  $0.7 \times 10^{-3}$  和  $5.6 \times 10^{-3}$ <sup>[6]</sup>。Wang 等<sup>[7]</sup>研究得出:华北平原温度每降低 1 °C, 大气降雨的  $\delta(^{18}O)$  减少  $-0.4 \times 10^{-3}$ 。不同地质历史时期的气温不同,在当时降雨的 D, <sup>18</sup>O 同位素组成上也会得到相应的反映。通过测试目前地下水的 D 和 <sup>18</sup>O, 就可以揭示含水层中地下水的形成历史,进而从宏观上评价区域地下水资源属性。

国外大量研究成果表明:许多大型区域含水层系统中地下水的 D 和 <sup>18</sup>O 同位素含量基本落在当地大气降水线附近,其值比现代大气降雨的同位素含量要低,且随地下水埋深(年龄)增加而降低,经地质、水文地质条件分析和同位素年代测定,这种低  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  的地下水不是现代大气降雨补给形成的,属于比较寒冷气候条件下由降水补给形成的“古水”,主要来自第四纪冰期的大气降水或融雪水。图 3 反映了晚第四纪期间补给的地下水  $\delta(D)$ ,  $\delta(^{18}O)$  与 <sup>14</sup>C

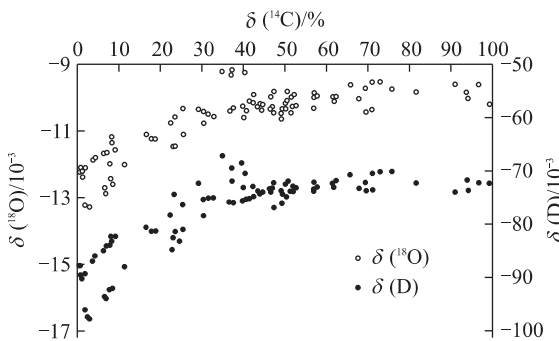


图 3 晚第四纪地下水  $\delta(D)$ ,  $\delta(^{18}O)$  与  $\delta(^{14}C)$  关系<sup>[8]</sup>  
Fig. 3 Relationships between  $\delta(D)$ ,  $\delta(^{18}O)$  and  $\delta(^{14}C)$  of Upper Quaternary groundwater

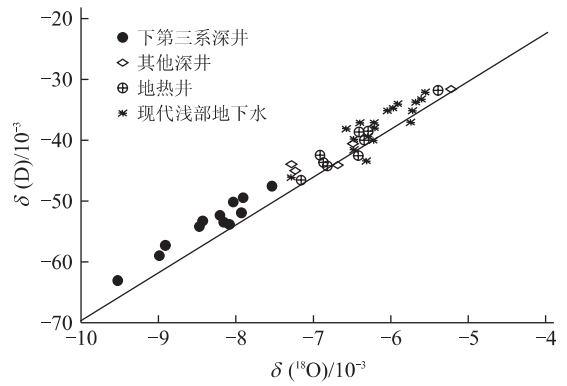


图 4 法国西南部 Aquitain 盆地地下水  $\delta(D)$ — $\delta(^{18}O)$  关系<sup>[9]</sup>

Fig. 4 Relationship between  $\delta(D)$  and  $\delta(^{18}O)$  of groundwater in Aquitain basin, southwestern France

质量分数(指现代碳的百分含量 pmc, 下文同)的关系<sup>[8]</sup>, <sup>14</sup>C 质量分数越低表示地下水形成年龄越老。

在法国西南部的 Aquitain 盆地,灌溉、地热和饮用水主要来源于白垩系和下第三系的深部含水层。地下水同位素研究发现<sup>[9]</sup>,地下水  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  均位于大气降雨线附近,深部地下水的  $\delta(D)$ ,  $\delta(^{18}O)$  远低于浅部地下水(见图 4),而且低  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  的地下水伴随的是低  $\delta(^{14}C)$  (<sup>14</sup>C 年龄大于 20 000 a)。研究地下水中溶解的 Ne, Ar, Kr, Xe 等惰性气体含量表明:深部地下水的补给温度比现在年平均气温(11~13 °C)低 5~7 °C。结合地质和水文地质条件, Aquitain 盆地的深部地下水应该是上个冰期末由大气降水补给而成。

撒哈拉沙漠中部 Ahaggar 地区的地下水资源主要赋存于浅部的冲积含水层、下覆地层的风化带含水层和深部基岩裂隙含水层中<sup>[10]</sup>。地下水同位素  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  均位于大气降水线附近,表明地下水来自大气降水补给。浅部冲积含水层中的地下水矿化度低(0.3 g/L 左右),  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  值与现代大气降雨基本一致, <sup>14</sup>C 活度(110%~115%)与现代大气降雨相似, 氡含量 8~16 TU<sup>①</sup>, 因此浅部冲积层中的地下水应是季节性洪水补给而成。风化带地下水矿化度较高(0.8 g/L 左右),  $\delta(D)$ ,  $\delta(^{18}O)$  和 <sup>14</sup>C 活度(75%左右)均较浅部冲积层地下水低,说明是较老的地下水,但与浅部地下水有水力联系。而深部基底裂隙水矿化度大于 1 g/L,  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  很低,完全不同于现代大气降雨;不含氡和 <sup>14</sup>C,属于很老的地下水,应来自寒冷时期的大气降雨补给。见图 5。

①TU 为氡的单位, 1TU=0.11 Bq/L。

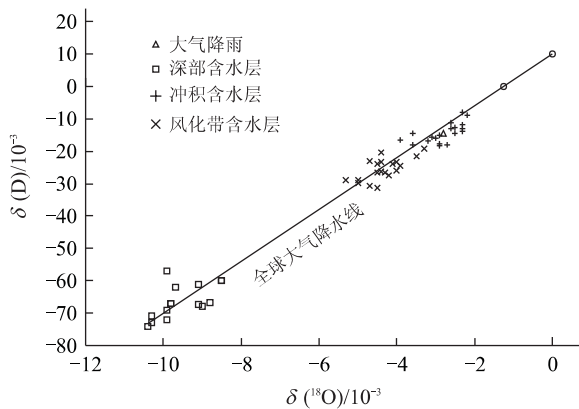


图 5 撒哈拉沙漠中部 Ahaggar 地区地下水  $\delta(D)-\delta(^{18}O)$  关系(数据引自 Saighi 等<sup>[10]</sup>)

Fig. 5 Relationship between  $\delta(D)$  and  $\delta(^{18}O)$  of groundwater in Ahaggar area, central Sahara

匈牙利大平原(第四纪含水层)目前有 4 万多口水井,积累了大量的水文、水化学资料.研究表明<sup>[11]</sup>,可以利用地下水的 D,  $^{18}O$  组分来鉴别其补给时代.地下水的  $\delta(^{18}O)$  剖面显示(图略),  $\delta(^{18}O)$  大于  $-10 \times 10^{-3}$  的地下水属于全新世补给的地下水,而比  $-10 \times 10^{-3}$  更低的地下水则属于更新世冰期补给的地下水.因为大平原更新世的补给温度比全新世要低好几度.地下水  $^{14}C$  数据完全支持这种观点:  $^{14}C$  含量沿流线(由水力学数据确定)逐渐降低;假设在全新世时期补给的地下水  $^{14}C$  含量大于 10%,而假设在更新世时期补给的地下水  $^{14}C$  含量小于 10%.

我国华北平原第四系地下水的  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  关系均处于当地大气降水线附近,而且出现  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  从第一含水组—第二含水组—第三含水组逐步降低的规律<sup>[3]</sup>.说明华北平原第四系地下水均来源于大气降雨补给,但不同含水组的地下水可能来自不同气候条件下的降雨补给.第一含水组地下水  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  与现在大气降水相近,可能来自现在降水的补给,地下水中含有很高的氦(可高达 80~100 TU)足以证明这种可能.而第二、三含水组地下水  $\delta(D)$ ,  $\delta(^{18}O)$  比现在大气降雨低得多,这些地下水可能来自比现在温度低的气候条件下的大气降雨补给.第二含水组地下水氦含量低,  $^{14}C$  年龄小于 2 000 a;第三含水组地下水不含氦,  $^{14}C$  年龄介于 10 000~20 000 a,证明了它们各自的补给条件.

我国鄂尔多斯盆地白垩系地下水  $\delta(D)$  和  $\delta(^{18}O)$  也存在类似的关系.

一般地,第四纪冰期补给的地下水其  $\delta(D)$  和

$\delta(^{18}O)$  比现代降水要低,利用地下水本身的 D 和  $^{18}O$  稳定同位素组成可以宏观定性分析区域含水层系统中的地下水资源属性.

以上分析的是深部地下水主要由较低气温(与现在相比)时期的大气降雨补给形成,干旱、半干旱地区的区域地下水资源可能多数属于这种情况.当然,如果地层中保留的地下水是在气温较高时期的大气降雨补给形成或由于蒸发作用所致,则地下水的  $\delta(^{18}O)$  和  $\delta(D)$  会明显高于现在大气降雨.

## 2.2 从放射性同位素组成看区域地下水资源属性

在地下水研究中,目前利用较多的放射性同位素主要是: T,  $^{14}C$  和  $^{36}Cl$ . 氚的半衰期 12.43 a,主要用于示踪较年轻的地下水(1953 年以来的水),  $^{14}C$  的半衰期 5 730 a,可以测定  $(1\sim 40) \times 10^3$  a 的地下水,而  $^{36}Cl$  的半衰期为  $3.01 \times 10^5$  a,可以测定  $(1\sim 10) \times 10^5$  a 的地下水.由于年轻地下水中的氟里昂也具有示年作用,测试技术也成熟,正逐步用于地下水示踪研究.由于利用地下水中的放射性同位素可以获得地下水的形成年龄,因此,研究地下水中的放射性同位素组成是定量评价区域地下水资源属性最直接、有效的办法.

Yarmouk 盆地的裂隙玄武岩含水层系统属于叙利亚最重要的含水层系统<sup>[12]</sup>.盆地冬季多雨寒冷,夏季干热.年均降雨 230~800 mm.地下水氦含量和  $^{14}C$  年龄表明,山区泉水的驻留时间短,100 a 之内.在盆地中部地下水年龄为 1 000 a 至 10 000 a.地下水氦含量和  $^{14}C$  年龄分布具有很好的一致性,地下水  $^{14}C$  年龄高的地区基本上不含氦,见图 6.

利用放射性同位素确定地下水的绝对年龄,首先要确定该同位素进入地下水系统前的初始含量,这是一件比较困难的事情,另外还要进行同位素校正.因此,有时就直接用放射性同位素的含量大小来表示含水层系统中地下水的相对年龄大小,并以此来分析区域含水层系统中地下水的补给和运移,评价区域地下水资源属性.

巴黎盆地地下水系统是一个经典的水化学研究范例<sup>[13]</sup>.含水层的等水位图表明巴黎盆地 Albian 含水层是水力连续的统一含水层,巴黎是其最低地下水排泄区.  $^{14}C$  含量分布情况(图 7)完全支持水动力数据得出的结论.

对于一些大型—特大型地下水系统,由于地下水形成时间十分漫长,地下水中  $^{14}C$  含量很低或基本上检测不到,这时利用  $^{36}Cl$  是一种有效的测年办



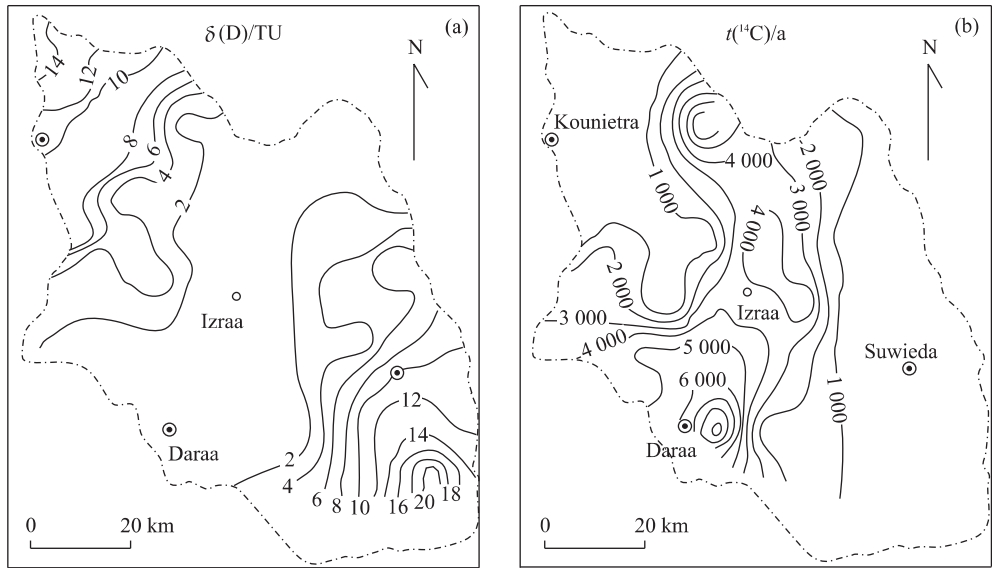


图 6 叙利亚 Yarmouk 盆地地下水氚和<sup>14</sup>C 年龄分布

Fig. 6 Tritium and <sup>14</sup>C age of groundwater in Yarmouk basin, Syria

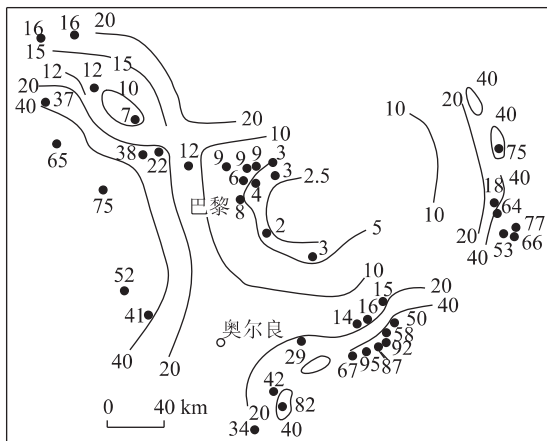


图 7 巴黎盆地地下水 δ(<sup>14</sup>C) 分布<sup>[13]</sup>

Fig. 7 δ(<sup>14</sup>C) distribution of groundwater in Paris basin

法. 澳大利亚大自流水盆地面积达  $150 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 属世界最大的地下水盆地之一, 是利用 <sup>36</sup>Cl 研究古老地下水形成时代的经典范例<sup>[14~16]</sup>.

澳大利亚大自流水盆地地下水流动十分缓慢, 在靠近补给区平均为 5 m/a, 而在盆地中心流速小于 1 m/a. 含水层中地下水中 <sup>36</sup>Cl/Cl 总的趋势是从补给区——排泄区逐渐降低, 计算的最大地下水年龄为  $(90 \sim 120) \times 10^4 \text{ a}$ , 结合水化学组分特征, 可以估算盆地西南排泄区地下水年龄为  $(100 \sim 220) \times 10^4 \text{ a}$ <sup>[16]</sup>.

可见, 利用地下水同位素数据是分析评价区域地下水资源属性的最直接、有效方法. 从上述研究实例不难看出, 具有一定规模的区域含水层系统, 其地

下水的同位素组成远不同于现代大气降雨, 地下水形成时间从千年到万年, 乃至百万年. 这说明区域地下水资源的更新周期远非人们想象的那么短.

### 3 人类活动对地下水资源属性的影响

在自然条件下, 每个区域含水层系统有其固有的地下水补给、径流、排泄条件, 从而决定了每个含水层系统中地下水的年龄分布和更新周期. 在地下水大规模开发之后, 原有的系统属性将会发生变化. 人们发现除了区域地下水水位下降外, 地下水温度、水化学组分和同位素含量也会出现明显变化. 这些变化说明, 原有系统的平衡被打破. 对于深部地下水系统而言, 一般地, 径流会加速, 更年轻的地下水将加入到深部地下水的循环中来.

天津市的地热资源开发就是一个很好的例子. 研究表明, 天津基岩热储(蓟县系—寒武—奥陶灰岩)中的地下热水主要是由 4 000~20 000 a 的大气降雨补给形成<sup>[17]</sup>. 1984 年的地热水不含氡, 但到 1998 年, 氡的浓度明显增加. 雾迷山组热储中的热水氡含量达到 2~13 TU, 奥陶系热水氡浓度上升到 4~11 TU. 同时, 随着氡含量的增加, 热水温度随之降低. 这说明, 大规模的深层地下水开发, 打破了原有的地下水流体系, 加速了深层地下水径流, 浅部低温地下水的进入是必然的事实.

华北平原承压水的大规模开发, 也改变了原有的

资源属性,过去不含氡的深层地下水也开始出现了氡,这表明深层地下水与浅层地下水存在水力联系。

当然,有些地区也存在与浅层淡水基本没有水力联系的“封存水”或淡水透镜体,这种地下水资源类似于石油资源,是不可再生的。像死海南部的裂谷自流含水层属于这种情况<sup>[18]</sup>。

目前,国外不少国家正在组织实施安全饮用水(secrete drinking water)计划,例如德国、奥地利等国,利用同位素技术,如果地下水的年龄在  $10^4$  a 以上,说明该地下水与地表没有直接联系,不易受污染。这种地下水勘探完后,要将其保存起来。国外将这种地下水作为战略资源保存,等发生核战争或核泄漏等严重事故后作为居民生存用水。

## 4 结论

区域含水层系统中的地下水资源是在一定时间尺度上可更新的水资源,其资源属性与现代大气降雨和地表水有明显不同。正确认识不同区域含水层系统中的地下水资源属性,并据此制定相应的地下水开发方案,对实现地下水资源可持续性具有重要意义。因此,一方面要认识到地下水资源的可恢复性,增强对利用地下水资源的信心;另一方面要注意到地下水资源可恢复的时间尺度,珍惜利用地下水资源。

同位素技术是研究地下水资源属性的重要有效工具,在开展区域性地下水资源调查评价工作中要重视同位素技术的应用。

人类地下水开采活动促使区域地下水系统的补给、径流和排泄条件发生变化,地下水资源属性也会发生相应变化。

### 参考文献:

[1] Appelo C A J, Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution [M]. Rotterdam: Balkema A A, 1996.

[2] Cook P G, John K B. Determining timescale for groundwater flow and solute transport [A]. In: Cook P G, Andrew L H, eds. Environmental tracers in subsurface hydrology [C]. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2000. 529.

[3] IAEA. Proceedings of a regional executive management seminar on isotope techniques in water resources development and management and a regional workshop on isotope hydrology for Asia and the Pacific organized by

the IAEA and held in Beijing [R]. Beijing, 15 — 26 June, 1987.

- [4] Oliver S. Groundwater: past achievements and future challenges [M]. Rotterdam: Balkema A A, 2000.
- [5] Eberts S M, George L L. Regional ground-water flow and geochemistry in the Midwestern basins and arches aquifer system in parts of Indiana, Ohio, Michigan, and Illinois [A]. US Geological Survey Professional Paper [C]. <http://water.usgs.gov/pubs/pp/>, 2000. 103.
- [6] Mazor E. Applied chemical and isotopic groundwater hydrology [M]. Milton Keynes: Open University Press, 1991. 274.
- [7] Wang D S, Wang K. Isotopes in precipitation in China (1986—1999) [A]. In: Water Resources Assessment: Isotope Techniques [C]. Technologies Sciences (Series E), 2001, 44 (Supplement): 192.
- [8] Klaus P S. Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications. Volume V: man's impact on groundwater systems [M]. Vienna: IAEA, 2001.
- [9] Blavoux B, Dray M, Fehri A, et al. Palaeoclimatic and hydrodynamic approach to the Aquitaine basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases [A]. In: IAEA, ed. Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere [C]. Vienna: IAEA, 1993. 293—305.
- [10] Saighi O, Michelot J L, Filly A. Isotopic characteristics of meteoric water and groundwater in Ahaggar Massif (central Sahara) [A]. In: IAEA, ed. Isotope techniques in water resources investigations in arid and semi-arid regions, IAEA-TECDOC-1207 [C]. Vienna: IAEA, 2001. 7—26.
- [11] Coplen T B, Herczeg A L, Barnes C. Isotope engineering — using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems [A]. In: Cook P, Herczeg A L, eds. Environmental tracers in subsurface hydrology [C]. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [12] Katten Z. Chemical and environmental isotope study of the fissured basaltic aquifer systems of the Yarmouk basin (Syrian Arab Republic) [A]. In: IAEA, ed. Isotope techniques in water resources development and management [C]. Vienna: IAEA, 1999. 674.
- [13] Mazor E. Chemical and isotopic groundwater hydrology [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1997. 413.
- [14] Bentley H W, Phillips F M, Stanley N D, et al. Chlo-

- rine-36 dating of very old groundwater, the Great Artesian basin, Australia [J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(13): 1991—2001.
- [15] Torgersen T, Habermehl M A, Phillips F M, et al. Chlorine-36 dating of very old groundwater 3. Further studies in the Great Artesian basin, Australia [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(12): 3201—3213.
- [16] Radke B M, Ferguson J, Cresswell R G, et al. Hydrochemistry and implied hydrodynamics of the Cadna-owie-Hooray aquifer, Great Artesian basin, Australia [M]. Canberra: Bureau of Rural Sciences, 2000. 229.
- [17] Wang K, Zhu J L. A conceptual model of the Tianjin geothermal system based on isotopic studies [J]. *Technologies Sciences (Series E)*, 2001, 44 (Supplement): 160—164.
- [18] Emanuel M. Interrelations between groundwater dating, palaeoclimate and palaeohydrology [A]. In: IAEA, ed. *Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere* [C]. Vienna: IAEA, 1993. 621.

## Groundwater Resources Attribute Based on Environmental Isotopes

WEN Dong-guang

(*China Geological Survey, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The paper put forward a concept of regional groundwater resources attribute from point of sustainability based on isotope information. It analyzed the distribution of groundwater age in the aquifer system, groundwater resources attribute in some regional aquifer systems using isotope data and the effect of human activities (groundwater exploitation) on regional groundwater resources attribute. It point out that the direct and cost-effective tool for assessment of regional groundwater resources attribute is environmental isotopes, and correct recognition and estimation of regional groundwater resources attribute will play a very important role on realizing groundwater resources sustainability.

**Key words:** regional groundwater resources attributes; environmental isotopes; age of groundwater; regional aquifer system.