

张国盟、刘耀炜、张磊等, 2015, 地下水测年方法及其在地震监测中的应用展望, 中国地震, 31(1), 1 ~ 10。

· 研究综述 ·

# 地下水测年方法及其在地震监测中的应用展望

张国盟<sup>1)</sup> 刘耀炜<sup>1)</sup> 张磊<sup>1, 2)</sup> 任宏微<sup>1)</sup>

1) 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京市海淀区安宁庄路 1 号 100085

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要** 对地下水动力学特征的观测与研究, 是地震前兆监测的重要方法之一。地下水动力学研究中, 利用地下水测年方法, 可以对地下水的补给、径流特征及更新能力作出定性和定量的分析。本文介绍了近年来国际上常用的地下水测年方法, 总结了前人在该领域的主要研究进展, 重点分析了地下水更新能力与地震前兆信息的关系、地下水运动规律与地震构造活动的关系以及地下水浅层补给与异常干扰排除的方法等。已有的研究成果表明, 地下水年龄的测定与分析方法对于了解监测点映震能力、评价构造活动与地震活动程度以及在观测资料异常变化的现场核实等方面, 可以发挥重要作用。

**关键词:** 地下水 年龄测定 地震监测

[文章编号] 1001-4683(2015)01-0001-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

随着新的理论、技术及方法的发展, 地震监测信息的获取能力有了显著提升。但是, 由于地下流体的产生、运移与表现等动态过程比较复杂, 且与地震的孕育发生密切联系的前兆机制较多(张炜等, 1988; 汪成民等, 1988), 因此要获取可靠的地震前兆异常信息和有效的地震监测预测方法, 就需要不断寻找和借鉴新的科学理论方法(刘耀炜, 2006)。目前, 地震预测研究面临的关键科学问题是, 如何从各种异常变化中准确判定哪些异常与地震的孕育、发生过程有关, 哪些是由观测环境变化等因素所引起的(刘耀炜等, 2009)。一般来讲, 与地震孕育、发生过程关系密切的流体异常变化往往反映了深部、远距离流体的补给、循环以及强烈的水-岩相互作用等过程; 而观测环境变化引起的干扰异常, 往往表现出地下流体的短距离或浅层补给以及较弱的水-岩反应过程等特点。地下水是地下流体的主要组成部分, 通过对地下水年龄的分析, 不仅能判定地下流体的补给来源, 还可以为分析地下水的水-岩反应程度提供重要依据。因此, 作为传统水文地质学方法之一的地下水年龄分析方法, 可在解

[收稿日期] 2014-03-15; [修定日期] 2014-07-07

[项目类别] 地震行业科研专项(201308006)资助

[作者简介] 张国盟, 男, 1988 年生, 在读硕士研究生, 主要从事地震地下流体方面的研究。

E-mail: guomeng\_zhang@163.com

决地下流体地震活动监测预测的一些问题中发挥一定的作用。

近年来,一些学者也在试图通过地下水年龄及水文地球化学等方法来探讨地下流体监测与活动构造及地震活动性的关系等方面的问题,例如:利用地下水年龄研究地下水循环及评价构造活动性,分析不同年龄地下水中化学成分及同位素变化与地震活动性的关系(Sano et al, 1998);通过对比分析,讨论地下水年龄对地震信息的敏感程度(潘树新等, 2001);综合利用地下水年龄、稳定同位素及水文地球化学等方法研究地下水来源、循环及地震活动构造特征等(Wang et al, 2005)。从发展趋势来看,地下水年龄分析方法有可能成为今后地下流体地震前兆监测研究的重要技术手段之一。

由于与地震相关的地下流体动态变化的多解性及地下水年龄测定方法的复杂性,因此,地下水年龄分析方法在地震监测预测中的应用及相关研究文献十分有限,尚未形成一套比较完整的方法。本文收集了国内外在相关领域的研究成果,概述了地下水年龄的理论依据和主要测定方法,论述了前人在评价地下水更新能力、分析地下水循环和地下水污染等方面的主要进展,重点讨论了地下水年龄分析方法在地下流体地震监测研究中能够解决的主要问题。

## 1 地下水年龄测定方法

地下水年龄,即地下水形成后距今的时间。换句话说,地下水年龄为降水离开大气、渗透到土壤形成地下水之后至今的时间,有时也被称为平均驻留时间(Mean Residence Time, MRT)。地下水测年方法分为放射性同位素示踪法、有机物示踪法和数值模拟计算法等。

### 1.1 放射性同位素示踪法

放射性同位素示踪法是根据放射性同位素衰变的原理来确定地下水年龄的方法。目前主要有 $^3\text{H}$ 法、 $^3\text{H}/^3\text{He}$ 比值法、 $^{14}\text{C}$ 法、 $^{85}\text{Kr}$ 法、 $^{39}\text{Ar}$ 法和 $^{36}\text{Cl}$ 法等,其中应用较多的是 $^3\text{H}$ 法、 $^3\text{H}/^3\text{He}$ 比值法和 $^{14}\text{C}$ 法。

(1)  $^3\text{H}$ 法。地下水中 $^3\text{H}$ 的浓度通常以 TU( $^3\text{H}$  单位)表示。 $^3\text{H}$ 法定年可直接测定地下水中的 $^3\text{H}$ 含量,再通过与当地大气中历年的 $^3\text{H}$ 平均含量曲线(输入函数)比对,进而确定其补给时间。 $^3\text{H}$ 测年曾经是应用非常广泛的一种测定年轻地下水年龄的方法(Nir, 1964; Egboka et al, 1983; Robertson et al, 1989)。但自从国际上停止了热核爆炸试验之后,放射性衰变使空气中的 $^3\text{H}$ 浓度呈指数级下降,目前已与自然环境水平十分接近(Bayari et al, 2006),因而导致单纯使用 $^3\text{H}$ 来测定地下水年龄变得十分困难(Liu et al, 2014)。

(2)  $^3\text{H}/^3\text{He}$ 法。 $^3\text{H}$ 经过 $\beta$ 衰变生成 $^3\text{He}$ ( $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \beta^-$ ),由此产生了测定地下水年龄的 $^3\text{H}/^3\text{He}$ 比值法。 $^3\text{H}/^3\text{He}$ 比值法主要用于测定近 50a 以内补给的地下水年龄。地下水中 $^3\text{He}$ 的测量值经大气 $^3\text{He}$ 校正后,来自 $^3\text{H}$ 衰变的 $^3\text{He}$ 的内增长可用于如下的年龄测定方程(Clark et al, 1997)

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \left( 1 + \frac{[^3\text{He}_t]}{[^3\text{H}_t]} \right) \quad (1)$$

式中,  $\frac{[^3\text{He}_t]}{[^3\text{H}_t]}$  为用 $^3\text{H}$ 单位表示的 2 种同位素的浓度比;  $T_{1/2}$  为 $^3\text{H}$ 的半衰期。

(3)  $^{14}\text{C}$ 法。 $^{14}\text{C}$ 的半衰期较长,通常用于测定古地下水年龄。 $^{14}\text{C}$ 法的表示方法是“现代

碳的百分比”,即 pmC (percent modern Carbon),这是一种相对浓度,其定义式为

$$A = (A_m / A_s) \times 100 (\text{pmC}) \quad (2)$$

式中, $A_m$ 为待测样品的放射性比度(每克 C 的放射性活度); $A_s$ 为标准样品(现代 C)的放射性比度。根据放射性同位素衰变原理,可确定地下水年龄的表达式

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{C}{C_0} \quad (3)$$

式中, $\lambda$ 为同位素衰变常数; $C_0$ 为补给时放射性同位素浓度(也称输入函数); $C$ 为计算时放射性同位素的浓度。

(4)其他测年方法。 $^{85}\text{Kr}$ 也是半衰期较短的放射性同位素,可用于测定年轻地下水的年龄,但由于其取样和测定过程复杂且测试费用较高,尚难成为常规的应用方法。 $^{39}\text{Ar}$ 的半衰期为 269a,非常适合测定次现代地下水年龄,但同样受到取样和分析方法的限制,而无法成为常规方法。 $^{36}\text{Cl}$ 也可用于测定古地下水的年龄,其半衰期更长,适于测定整个第四纪阶段的年龄。

几种放射性同位素的半衰期及测年范围见表 1。

表 1 几种放射性同位素的半衰期及相应的测年范围

放射性同位素	半衰期/a	测年范围/a	应用评价
$^3\text{H}$	12.32	<50	现代年龄水分析;常规方法
$^{85}\text{Kr}$	10.76	<50	现代年龄水分析;非常规方法
$^{39}\text{Ar}$	269	40~1000	现代年龄水分析;非常规方法
$^{14}\text{C}$	5730	2000~20000	古水年龄分析;常规方法
$^{36}\text{Cl}$	301000	60000~2000000	适合卤水年龄测定;非常规方法

## 1.2 有机物示踪法

有机物示踪法是利用有机物测定地下水年龄的方法。由于水中的一些有机物难以降解并且随着水流运动,故可用来确定地下水的年龄。可用于地下水定年的有机物主要有 CFCs 和  $\text{SF}_6$ 。

CFCs 的英文全名为 Chlorofluorocarbons,中文名为氟利昂,是一类人工合成有机物,包括 CFC-11、CFC-12 和 CFC-113 等多种化合物,来源于人工生产的制冷剂、清洗剂和发泡剂等,无天然来源(李阳春等,2006)。20 世纪 70 年代末 Thompson 等(1979)开始利用 CFCs 作为示踪剂研究地下水。20 世纪 90 年代以后,一些学者进行了较系统的地下水 CFCs 定年研究(Dunkle et al, 1993; Oster et al, 1996; Han et al, 2001)。相关学者把 CFCs 作为一类有效的环境示踪物质,根据历年大气中 CFCs 浓度的变化曲线,研究水循环和地下水年龄(秦大军,2002;李晨等,2009)。CFCs 方法可以较好地确定 1950~1990 年补给的地下水年龄,目前该方法已在水资源评价研究中得到广泛的应用(张玉玺等,2008)。

六氟化硫( $\text{SF}_6$ )是一种无色、无嗅、无毒、不易燃烧的气体。大气和水中的  $\text{SF}_6$  既有天然来源也有人工来源,且以人工来源为主。 $\text{SF}_6$  特别适合研究 1970 年以后补给地下水的年龄(张俊刚等,2005),这在一定程度上弥补了年轻地下水测年的空白。李小倩等(2008)综述了  $\text{SF}_6$  在地下水应用中的研究现状,认为其在地下水研究中的应用具有潜在的优势,国外已对其展开了大量的研究工作,而我国的研究尚处于起步阶段。

CFCs 法和  $\text{SF}_6$  法测定地下水年龄的原理与  $^3\text{H}$  法相似,也是将待测样品中示踪剂的含量与输入函数进行对照,校正后得出地下水年龄值。图 1 为美国华盛顿地区大气中环境示踪剂浓度的年平均背景值。

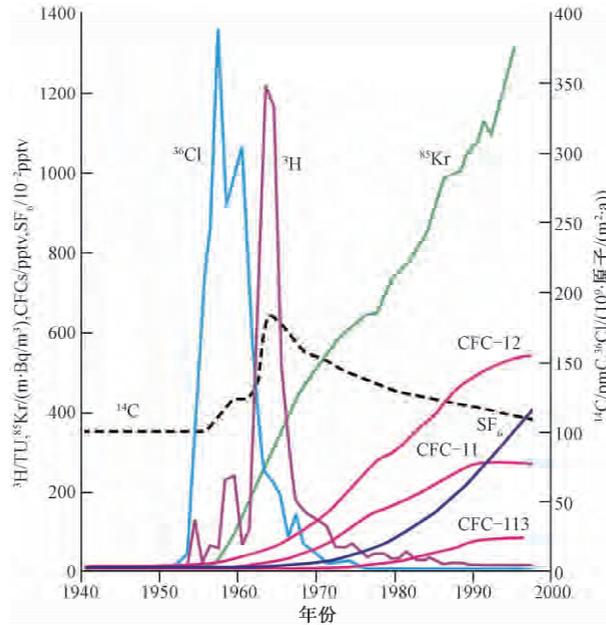


图 1 大气中环境示踪剂浓度的年平均背景值(据 Alley 等(2002))  
pptv 即 parts per trillion by volume(万亿分之一的体积比)

### 1.3 数值模拟

使用放射性同位素及有机物示踪的方法可以估算地下水的年龄,但往往会因为忽视了地下水中的弥散及混合作用而导致地下水年龄测定结果出现较大误差。因此,考虑地下水溶质运移过程中的动力弥散作用,建立数学物理模型进行地下水年龄的数值模拟计算,是一种新的地下水年龄分析方法。

数值模拟方法是基于地下水流的运移规律,建立地下水流的模型,以计算地下水年龄的方法。该方法适用于非均质含水层中距今几十到几百年的地下水年龄的估算。

基于质量守恒定律,Goode(1996)提出了非稳定流条件下地下水年龄的质量控制方程。Engesgaard 等(1998)根据该方程对丹麦 Rabis Creek 含水层的地下水年龄进行了数值模拟分析,并且与利用地下水中  $^3\text{H}$  浓度得出的地下水年龄(Engesgaard et al, 1996)进行对比后发现,二者具有较好的一致性和互补性,证明了地下水年龄数值模拟方法的有效性。测定地下水年龄的数值模拟方法为丰富地下水年龄的研究提供了有效的技术途径。

目前,国际上普遍认可的分析过程是使用多种测年方法,通过比较和校正,综合分析地下水年龄(Ekwurzel et al, 1994;Plummer et al, 2001;Darling et al, 2012)。

## 2 地下水更新能力与地震监测点的映震效能

在地下流体观测中,由于各观测点水文地质条件以及含水层岩性的不同,地下水的可更

新能力也不同,从而表现为观测点的映震能力有较大的差异性。

地下水的更新是指含水层中储存的地下水通过含水层接受水源补给而得以被替换或代替的过程(翟远征等,2011)。地下水年龄小,则表明地下水运动快,可更新能力较强;反之,则表明地下水可更新能力较差。地下水年龄的大小为评价地下水的可更新能力提供了科学的依据。陈宗宇等(2004)利用地下水中的 $^3\text{H}$ 和 $^{14}\text{C}$ ,计算了黑河流域的地下水年龄,其潜水年龄多数小于50a,具有可再生性;而酒泉东盆地排泄区承压含水层中地下水的年龄为2338~5569a;额济纳附近的深层承压含水层中地下水的年龄为5486~8630a,地下水资源可更新能力较差。另外,根据剖面上地下水年龄的垂向变化规律,还可以估算出该含水层的补给速率(苏小四,2002)。例如,Solomon等(1993)利用 $^3\text{H}$ 及其衰变子核 $^3\text{He}$ 测定了加拿大安大略省Strurgeon Falls地区的地下水年龄,计算出了地下水的补给速率为0.16m/a。地下水的补给速率为评价地下水可更新能力提供了重要参考依据。

相关研究认为,地下流体观测点的映震能力可能与携带地震前兆信息的地下水年龄存在一定的关系(潘树新等,2001)。地下水年龄太小可更新能力强,表明地下水在岩体中贮留的时间短,则不能充分反映地壳介质的地球物理和地球化学环境的变化信息。如果地下水贮留时间太长且可更新能力弱,地下水也不能及时地反映出地壳介质的地球物理和地球化学环境的变化信息。年龄适中的地下水的可更新能力也比较适中,可能更适合开展地震前兆的监测。

潘树新等(2001)在总结了全国水化观测台网中一些主要泉点的地震前兆异常情况与地下水年龄的关系后发现,地下水年龄的大小与观测点的地震前兆类型有一定的关系。一些地下水年龄较小的冷泉,往往会出现临震突跳异常。譬如,四川姑咱冷泉的地下水年龄小于1a,该泉的水氢含量在1973年炉霍7.4级强震之前就出现了临震突跳异常(张炜等,1988)。这可能是由于地下水在岩体中贮留时间短,水岩反应不充分,很难产生持续时间较长的异常变化,而在临震阶段由于孕震作用加强而产生临震异常。一些地下水年龄适中的冷泉和低温温泉,在中强以上地震前往往表现出较完整的中短期异常特征。如1988年云南澜沧7.6级地震前四川西昌太和自流井汞异常(邢玉安等,2000)。年龄适中的地下水水岩反应较充分,所以易于产生短期异常。一些地下水年龄较大的温泉,譬如,地下水年龄达到几千年甚至上万年,其在地震前多表现为短临异常(汪成民等,1991);天津咸水井的资料也证实,地质历史时期受海相层中的封存海水被污染、咸化而形成的咸水层(地下水年龄较大)用于地震观测优于后期海侵形成的咸水层(地下水年龄较小),前者多表现出少于3个月的短临异常(邵永新等,2011)。

以上研究表明,地下水年龄不仅可以用来评价地下水的可更新能力,还可以作为评价观测点映震效能的定性指标。当年龄较大或年龄太小的地下水出现异常时,应注意地震短临与临震阶段的异常分析;而对于年龄适中的地下水观测点,则应注重中短期地震异常的分析。

### 3 地下水运动规律与地震活动性

地下水年龄不仅可以用来评价地下水的可更新能力和映震效能,同时也可以用来研究地下水的运动规律、评价地震介质的活动性。

地下水的运动规律主要包括地下水的循环特征、流动路径和流动速率等。水经过补给进入地下,在地下含水层介质中流动,并最终以泉或井的形式排泄,这就完成了地下水的水文地质循环。理论上讲,在一个完整的含水层系统中,从地下水的主要补给区到主要排泄区,地下水的年龄应当是逐渐增大的(翟远征等,2011)。因此,根据地下水年龄在地下水流系统中的分布规律,可以有效识别地下水的补给区、径流区和排泄区,进而研究其水文地质循环特征。Qin 等(2012)2002~2004年连续3年在黑河流域进行调查和取样,利用 CFCs 和<sup>3</sup>H 定年,结合该地区的氢氧稳定同位素和水化学特征,研究了黑河下游河水入渗补给区、径流区和排泄区的识别问题。地下水年龄从主要补给区到主要排泄区是逐渐增大的,从埋藏浅部到深部年龄一般也是逐渐增大的。因此,可以根据地下水年龄的二维空间分布规律,识别地下水的水平和垂向径流路径,并计算径流速度。Smethie 等(1992)根据地下水中<sup>85</sup>Kr 的年龄分布测定了加拿大安大略省 Borden 含水层中地下水的垂向和水平径流路径。

补给是地下水循环的首要环节,地下水年龄可以用于估算地下水的补给速率,而地下水补给速率的变化(由季节性融雪或降水的变化引起)可能会诱发地震。在主断裂上,快速的地下水补给有可能会引起更大的地震( $M_L > 3$ ) (Saar et al,2003)。因此,地下水的补给对于研究地震活动性具有重要的意义,通过研究含水介质的受力机制和模型,并结合地下水的补给速率及其变化,可以有效地评价其活动性。除此之外,水化学和有关的地质学与地球物理学数据可以用来识别地下水循环与地震活动构造之间的关系。如延怀盆地地下热水的循环深度为 5km (Wang et al,2005),而根据地球物理勘探的结果,在 10~20km 深度内存在高电导率地层,这表明在地下水循环活跃的含水层和高电导率地层之间存在坚硬的夹层,中小地震经常源于此(车用太等,2000)。这是因为当区域结构应力逐渐增加时,地下水可能会强化剪切应力集中现象,并通过高孔隙压力和断层带与周围坚硬地层间的相互作用来降低抗剪强度(车用太等,2000)。因此,可以通过地下水年龄研究地下水的循环与径流速度。如果地下水循环速度较快,在深部的坚硬夹层,则有可能发生中小地震。

总之,根据地下水年龄的分布判定地下水的循环特征,识别地下水的补给区、径流区和排泄区,估算地下水的补给和径流速率以及开采地下水的“年龄”,可以为确定地震活动性水平提供重要的信息。地下水的流动与地震活动性的关系或许可以通过地下水年龄和地球化学的手段来确定,这方面仍需要开展更深入的理论和实例研究。

#### 4 地下水的非构造影响与干扰异常排除

在地下流体观测过程中,地下水的化学成分有可能受到人为或自然过程的干扰而发生变化,这可能导致地下水受到“污染”,如地下水资源超采(孙小龙等,2013)、地热开采、污染物排放以及海水倒灌等问题往往会影响地下水的化学成分含量。孟淑德等(1979)通过几个震例研究了震前地下水的化学成分异常现象,认为震前水文地球化学的变化,除深层物质上涌外,多数是在含水层及其围岩受应力作用产生应变的过程中发生的。因此,如何区分地震因素与污染引起的地下水化学异常变化,排除污染干扰,识别地震前兆异常,则一直是地震监测与预测研究中需要解决的问题。而地下水年龄或许能够通过判定地下水来源和评价地下水污染,进而在排除非构造因素影响、提取与地震有关的异常信息等过程中发挥作用。

地下水的补给过程十分复杂,利用传统的手段识别地下水补给来源往往得不到很好的

结果,而地下水中的示踪剂随着补给过程与地下水一起运动,从而使得地下水定年技术成为认识地下水补给过程的理想方法。早在 1974 年,Verhagen 等(1974)通过测定 Kalahari 北部地下水中 $^3\text{H}$ 和 $^{14}\text{C}$ 的年龄,首次明确指出该地区地下水的补给源为现代雨水。近年来,杨丽芝等(2009)利用 $^3\text{H}$ 和 $^{14}\text{C}$ 测定了鲁北平原的地下水年龄,其浅层地下水的主要补给来源为当地的大气降水和引来的黄河灌溉水,深层地下水主要起源于古代大气降水。可见地下水年龄在判定地下水来源方面具有一定的应用价值。而地下水的补给来源又是判别地震流体异常的分析依据。因此,采用地下水测年方法分析地下水是源于深层水的混入还是浅层水或者降水的补给,或者由于地下水超采和干旱少雨缺少补给引起的水位下降等等,都是排除地震前兆异常时需要考虑的重要因素。

而地下水年龄在地下水污染研究方面的应用主要体现在两个方面:一是地下水年龄可以用于评估含水层对于外来污染物的抵抗能力。现代补给的地下水容易受到污染,而核爆之前的次现代和古地下水则相对稳定,如 Manning 等(2005)用 $^3\text{H}/^3\text{He}$ 比值法测定犹他州 Salt Lake Valley 地下水年龄并用于评价地下水污染状况,其结果表明地下水年龄是评价地下水污染状况的非常有用的指示信息。二是一些学者试图通过建立地下水年龄与地下水中污染物浓度之间的关系来揭示地下水污染物的迁移规律,如 Gourcy 等(2009)通过用 CFCs、 $\text{SF}_6$ 和 $^3\text{H}$ 等对地下水定年,揭示出法国 Martinique 地区地下水中氮和农药的浓度与地下水年龄成反比关系,进而对这两种污染物的迁移规律做了分析和预测。地下水污染会造成地下水化学成分的正常变化,为非构造影响,可以用来排除地震异常。通过以上两方面的研究,我们可以认识到,无论是由于地下水补给过程还是由于地下水污染导致的地下水化学成分变化,都可以用于排除非构造因素引起的“干扰异常”。

## 5 结论与讨论

应用地下水年龄分析结果,可以研究地下水的补给源、运移过程等,并可用于解决地震地下流体监测中的一些科学问题,为剔除干扰异常、获取地震过程的前兆信息等提供新的技术手段。综合相关研究成果和以上分析,得到了以下主要认识:

(1) 地下水年龄不仅可以用来评价地下水的可更新能力,还可以应用于地震监测点映震效能的评估。若地震监测井(或泉)的地下水年龄适中,则适合开展地下水化学组分的地震信息监测,并较容易获取各阶段地震前兆异常信息;若地下水年龄过小(可更新能力强)或地下水年龄过大(可更新能力弱)的监测井(或泉),则对地震信息的获取能力会受到一定限制,有可能仅能反映地震短临阶段的异常信息。

(2) 利用地下水年龄可以研究地下水的循环特征。通过识别地下水的补给区、径流区和排泄区,估算补给和循环速率以及超采区地下水年龄的大小,进而可以评价相关地质构造的活动程度。

(3) 基于由地下水年龄确定地下水来源的原理,可以对由于地表水补给或其他非深层水补给造成的地下水干扰异常进行排查,以确定是由于构造活动引起深部流体运移产生的异常,还是由于构造变动引起的流体混合等产生的异常,进而获取可能与构造活动或地震孕育相关的地震前兆异常。

虽然地下水测年技术在地震地下流体科学研究中应用的实例还较少,其分析方法也受

到各方面因素的影响,但根据相关学科的应用实例来看,随着今后地震监测技术的发展,该技术应会有广泛的应用前景。

## 参考文献

- 车用太、刘五洲、鱼金子等,2000,板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设,地震学报,22(1),93~101。
- 陈宗宇、聂振龙、张荷生等,2004,从黑河流域地下水年龄论其资源属性,地质学报,78(4),560~567。
- 李晨、秦大军,2009,关中盆地浅层地下水 CFC 年龄的计算,工程勘察,9,39~44。
- 李小倩、周爱国、张俊刚等,2008, SF<sub>6</sub> 在地下水应用中的研究现状,地球学报,29(5),665~670。
- 李阳春、徐永福、赵亮等,2006,全球海洋模式对 CFC-11 分布的初步模拟研究,大气科学,30(4),671~681。
- 刘耀炜,2006,我国地震地下流体科学发展 40 年探索历程回顾,中国地震,22(3),210~222。
- 刘耀炜、任宏微、王博,2009,环境同位素及其示踪技术在地震预测研究中的应用前景,地学前缘,16(2),369~377。
- 孟淑德、陈淑海,1979,从几个震例来探讨水文地球化学预报地震的若干问题,地震地质,1(4),61~71。
- 潘树新、高安泰,2001,地下水年龄与泉点映震能力的关系及其在地震预报中应用的初步探讨,西北地震学报,23(2),189~193。
- 秦大军,2002,用氟里昂(CFC)数据确定地下水的补给年龄,地质评论,48(增刊),210~214。
- 邵永新、马建英、张磊,2011,天津地区咸水层观测井的改造与优化问题讨论,国际地震动态,(3),18~26。
- 苏小四,2002,同位素技术在黄河流域典型地区地下水可更新能力研究中的应用——以银川平原和包头平原为例,博士学位论文,长春:吉林大学。
- 孙小龙、刘耀炜、晏锐,2013,云南姚安井 2009 年 10 月后水位下降的成因分析,地震学报,35(3),410~420。
- 汪成民、李宣瑚、魏柏林,1991,断层气测量在地震科学中的应用,北京:地震出版社。
- 汪成民、万迪堃、董守玉,1988,地下水微动态研究,北京:地震出版社。
- 邢玉安、王吉易,2000,水氢动态图强震危险区预测的新方法,地震,20(4),1~6。
- 杨丽芝、张光辉、刘中等,2009,鲁北平原地下水同位素年龄及可更新能力评价,地球学报,30(2),235~242。
- 翟远征、王金生、左锐等,2011,地下水年龄在地下水研究中的应用研究进展,地球与环境,39(1),113~120。
- 张俊刚、李晶晶、周爱国等,2005,大气和地下水中 SF<sub>6</sub> 测试技术,地球学报,26(B09),293~295。
- 张炜、王吉易、鄂秀满等,1988,水文地球化学预报地震的原理与方法,北京:教育科学出版社。
- 张玉玺、孙继朝、黄冠星,2008,CFCs 环境示踪技术的研究进展及发展趋势,工程勘察,12,26~30。
- Alley W M, Healy R W, LaBaugh J W, et al, 2002, Flow and storage in groundwater systems, Science, 296(5575), 1985~1990。
- Bayari S, Ozyurt N N, Hatipoglu Z, et al, 2006, Groundwater age: a vital information in protecting the groundwater dependent ecosystem, Groundwater and Ecosystems, 70, 33~46。
- Clark I D, Fritz P, 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology, U S: Lewis Publishers。
- Darling W G, Goody D C, MacDonald A M, et al, 2012, The practicalities of using CFCs and SF<sub>6</sub> for groundwater dating and tracing, Applied Geochemistry, 27(9), 1688~1697。
- Dunkle S A, Plummer L N, Busenberg E, et al, 1993, Chlorofluorocarbons (CCl<sub>3</sub>F and CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) as dating tools and hydrologic tracers in shallow groundwater of the Delmarva Peninsula, Atlantic Coastal Plain, United States, Water Resources Research, 29(12), 3837~3860。
- Egboka B C E, Cherry J A, Farvolden R N, et al, 1983, Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study. 3. Tritium as an indicator of dispersion and recharge, Journal of Hydrology, 63(1), 51~80。
- Ekwurzel B, Schlosser P, Smethie W M, et al, 1994, Dating of shallow groundwater: Comparison of the transient tracers <sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He, chlorofluorocarbons, and <sup>85</sup>Kr, Water Resources Research, 30(6), 1693~1708。
- Engesgaard P, Jensen K H, Molson J, et al, 1996, Large-scale dispersion in a sandy aquifer: Simulation of subsurface transport of environmental tritium, Water Resources Research, 32(11), 3253~3266。
- Engesgaard P, Molson J, 1998, Direct simulation of ground water age in the Rabis Creek aquifer, Denmark, Groundwater, 36(4), 577~582。

- Goode D J, 1996, Direct simulation of groundwater age, *Water Resources Research*, **32** (2), 289 ~ 296.
- Gourcy L, Baran N, Vittecoq B, 2009, Improving the knowledge of pesticide and nitrate transfer processes using age-dating tools (CFC, SF<sub>6</sub>, <sup>3</sup>H) in a volcanic island (Martinique, French West Indies), *Journal of Contaminant Hydrology*, **108** (3), 107 ~ 117.
- Han L, Pang Z, Manfred G, 2001, Study of groundwater mixing using CFC data, *Science in China Series E: Technological Sciences*, **44** (1), 21 ~ 28.
- Liu J, Chen Z, Wei W, et al, 2014, Using chlorofluorocarbons (CFCs) and tritium (<sup>3</sup>H) to estimate groundwater age and flow velocity in Hohhot Basin, China, *Hydrological Processes*, **28** (3), 1372 ~ 1382.
- Manning A H, Kip S D, Thiros S A, 2005, <sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He age data in assessing the susceptibility of wells to contamination, *Ground Water*, **43** (3), 353 ~ 367.
- Nir A, 1964, On the interpretation of tritium 'age' measurements of groundwater, *Journal of Geophysical Research*, **69** (12), 2589 ~ 2595.
- Oster H, Sonntag C, Münnich K O, 1996, Groundwater age dating with chlorofluorocarbons, *Water Resources Research*, **32** (10), 2989 ~ 3001.
- Plummer L N, Busenberg E, Böhlke J K, et al, 2001, Groundwater residence times in Shenandoah National Park, Blue Ridge Mountains, Virginia, USA: a multi-tracer approach, *Chemical Geology*, **179** (1), 93 ~ 111.
- Qin D, Zhao Z, Han L, et al, 2012, Determination of groundwater recharge regime and flowpath in the Lower Heihe River basin in an arid area of Northwest China by using environmental tracers: Implications for vegetation degradation in the Ejina Oasis, *Applied Geochemistry*, **27** (6), 1133 ~ 1145.
- Robertson W D, Cherry J A, 1989, Tritium as an indicator of recharge and dispersion in a groundwater system in central Ontario, *Water Resources Research*, **25** (6), 1097 ~ 1109.
- Saar M O, Manga M, 2003, Seismicity induced by seasonal groundwater recharge at Mt Hood, Oregon, *Earth and Planetary Science Letters*, **214** (3), 605 ~ 618.
- Sano Y, Takahata N, Igarashi G, et al, 1998, Helium degassing related to the Kobe earthquake, *Chemical Geology*, **150** (1), 171 ~ 179.
- Smethie W M, Solomon D K, Schiff S L, et al, 1992, Tracing groundwater flow in the Borden aquifer using krypton-85, *Journal of Hydrology*, **130** (1), 279 ~ 297.
- Solomon D K, Schiff S L, Poreda R J, et al, 1993, A validation of the <sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He method for determining groundwater recharge, *Water Resources Research*, **29** (9), 2951 ~ 2962.
- Thompson G M, Hayes J M, 1979, Trichlorofluoromethane in groundwater—a possible tracer and indicator of groundwater age, *Water Resources Research*, **15** (3), 546 ~ 554.
- Verhagen B T, Mazor E, Sellschop J P F, 1974, Radiocarbon and tritium evidence for direct rain recharge to ground waters in the northern Kalahari, *Nature*, **249** (14), 643 ~ 644.
- Wang G C, Zhang Z, Wang M, et al, 2005, Implications of ground water chemistry and flow patterns for earthquake studies, *Ground Water*, **43** (4), 478 ~ 484.

## Groundwater dating and its application to earthquake monitoring

*Zhang Guomeng*<sup>1)</sup> *Liu Yaowei*<sup>1)</sup> *Zhang Lei*<sup>1, 2)</sup> *Ren Hongwei*<sup>1)</sup>

1) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China

2) Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

**Abstract** It is a significant method to monitor and study on the dynamic characteristics of groundwater for earthquake monitoring and prediction. For the research of groundwater dynamics, groundwater dating can provide quantitative basis on the characteristics of groundwater recharge and runoff as well as the renewal capacity. This article illustrates the methods used globally and summarizes the main advances and achievements in groundwater dating. It also focuses on the relationships between groundwater renewal capacity and seismic monitoring, groundwater movement and seismic activity, shallow groundwater recharge and abnormal interference elimination. The studies show that groundwater dating plays an important role in water-rock interaction, geological tectonic and seismic activity evaluation. Therefore, groundwater dating can be widely used to monitor and analyze the seismic information within underground fluid in the near future.

**Key words:** Groundwater Age dating methods Earthquake monitoring and forecasting