

# 环境同位素信息在研究河北平原第四系地下水中的应用

姜先桥

(河北省环境地质勘察院 石家庄 050021)

**摘要：**运用同位素技术对地下水进行研究，已被国内外众多学者所认可。本文从更新世以来的古气候、古沉积环境入手，对河北平原大尺度的地下水自然循环演化进行了论述，应用同位素理论，提取地下水中环境同位素的相关信息，对河北平原地下水系统的演化过程及机制、地下水的补给、径流、排泄特征进行了阐释，说明同位素信息仍是研究地下水最重要的科学依据之一。

**关键词：**河北平原 环境同位素 第四系地下水 信息

河北平原北靠燕山、西依太行、东临渤海、环绕京津，面积73129km<sup>2</sup>，耕地6000多万亩，人口5000余万，经济发达，城市化程度较高，是我国北方重要的粮棉生产基地。本区属于暖温带半湿润半干旱季风气候，多年平均降雨量为500~600mm，但受季风影响，降水和河川径流分布极不均匀，形成春旱秋涝的自然特点。

河北平原是典型的山前倾斜平原，巨厚的松散第四系地下水是本区主要的供水水源。为了区域经济的发展，20世纪50年代末期开始，修建了一系列的水利工程和水利设施，对洪、涝、碱、咸灾害的进行了综合治理，70年代以来，随着对地下水需求量的日益增大，人们开始打机井开发利用地下水资源。这些活动有效地减轻了洪、涝、碱、咸灾害，为工农业发展创造了有利条件，但也正因为这些活动，改变了地下水的补给、径流、排泄条件，导致地下水位大幅度下降。目前，在山前的局部地区第Ⅱ含水岩组已被疏干，在较大的区域性水位降落漏斗中心部位，深层地下水水位标高已降至渤海海平面数十米以下，区域地下水流场的变化正在给该区的发展不断带来危害。就地下水的开发而言，需要研究地下水系统演化史，而环境同位素技术为研究地下水系统循环演化提供了信息。

## 1. 更新世以来古沉积环境及大尺度地下水循环自然演化特征

河北平原地下水是在晚更新世以来地质、地理格局和环境变化背景下构成的水文地质结构复杂而相互联系的地下水系统。其自然循环演化特征受晚更新世末期以来，特别是全新世以来的新构造运动、海平面升降和古气候、古环境变化的影响。

河北平原新构造运动始于新第三纪初期，其造成的地形差异影响着自然和水文地质环境的变化。晚更新世晚期以来，山地与平原有两次差异性升降运动：一次是早全新世，另一次是晚全新世。早全新世——中全新世时期，河流都向北改道，晚全新世河流又向南改道。华北平原的沉降有着不等幅的斜掀式下降运动的特点，垂直方向上多期古河道重叠或交接密集分布在基底拗陷区。沉积速率在时间上表现为中全新世最大，其次是晚全新世，再次是更新

世玉木主冰期和早全新世,这种差异说明山地的两次构造抬升影响了平原西部和北部,同时中全新世海平面抬升引起平原加速沉积。

河北平原地下水的循环演化具有周期性的规律,与古气候变化、构造运动和海平面变化相对应,地下水的补给具有阶段性不等幅,补给期与非补给期交替出现的规律,补给期对应于气候温暖湿润期,非补给期对应于气候冷干时期。地下水化学环境的演化在继承晚更新世大陆盐化特征的基础上,以持续盐化作用为主要演化规律,在晚全新世有一次强烈时期,近期减弱。

地下水的演化与古环境、古气候密切相关,根据环境同位素信息,河北平原地下水的演化大致分为4个阶段:

末次冰期盛期补给和地下水咸化发育阶段(晚更新世3-13kaBP):气候寒冷干燥,降水少而且集中,植被为草原型。山前平原为洪积扇形成期,中东部平原为古河道形成期,洪泛平原广布。第二组含水层形成,为潜水含水层,河流补给起着主要作用,山前区水交替快而中东部较慢。由于海平面低,第三和第四含水组中水流速度加快,水头降低,更新出更老的水。此时期对应同位素特征是:地下水中氢氧稳定同位素含量贫。

冰后期补给间断和地下水咸化强烈阶段(更新世向全新世过渡期13-11kaBP):气候冷暖和干湿变化频繁,以干燥为主,降水量不稳定,植被仍为草原型,但风力作用增强,因此潜水含水层之上普遍覆盖黄土。此时期的地下水中氢氧稳定同位素含量振荡升高。

全新世连续补给和地下水淋滤阶段(早中全新世气候适宜期10-4kaBP):气候温和湿润,降水量大而稳定,植被为森林、草原,河流流量变化大,沼泽广布。初步形成全新世潜水含水层。大量冰雪融水在早期融化,补给进入承压含水层,随着海平面升高而滞留在含水层中。这一时期发育了全新世潜水含水层的主要部分。氢氧稳定同位素含量相对全新世总体特征较贫,反映出降水量大的特征。

全新世间断性补给和地下水咸化减弱阶段(晚全新世 3kaBP -今):气候温凉偏干,降水量在湿润期和干旱期变化较大,平均降水量 600mm 左右。河流流量小,含砂量大。此时期形成现代第一含水层及包气带,补给呈间断性,补给量小,以潜水参与水循环为主,深层承压水接受补给很少,仅发生在山前含水层出露区。潜水及山前深层水同位素特征与现代大气降水相近,中东部深层承压水仍为冰期水特征,说明水交替缓慢。

## 2、河北平原第四系地下水系统结构特征

河北平原第四系地下水系统以中朝准地台的华北断坳为基底,新生代以来以沉降为主伴随短暂上升,坳陷区与隆起区之间存在明显降幅差异。根据沉积成因分为3区(图2-1):以洪积冲积为主的山前平原区、冲积湖积多层叠积的中部及东部平原区以及冲积湖积为主夹有数层海相层组成的滨海平原区。3区受控于统一的构造应力场,经受了类似的古气候变化和古水流作用,有一个大致相同的物源区,它们具有生成上的内在联系,因而存在着空间结构上的过渡关系,为地下水统一动力场和化学场的形成提供了基本条件和背景。

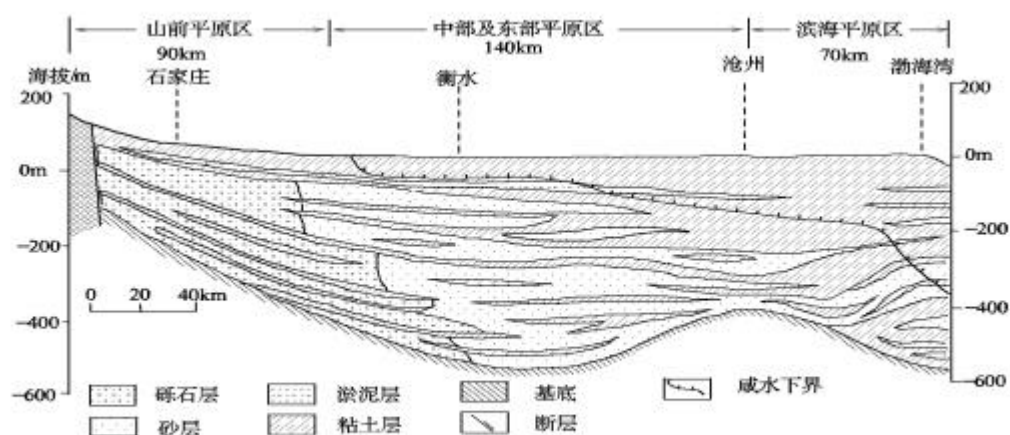


图 2-1 河北平原第四系水文地质剖面图

近几十年的地下水强烈开采不仅已开始对其自然平衡分布产生影响,这种影响体现在水位的降低、水量的减少、地下水位降落漏斗的产生和水质的恶化,而且已对含水系统的结构产生不可逆转的影响,其后果是严重的。

前人的研究告诉我们,华北平原第四系地下水是一个统一而连续的地下水流系统,无论是在天然条件下还是在开采条件下,浅层地下水流动系统和深层地下水流动系统之间均存在着水量和水力的联系,地下水运动具有整体的属性和分异性。

天然条件下,浅层地下水的补给来源主要是大气降水,其次是山区侧向地下径流补给,山前平原主要以地下径流的方式向下游排泄,中东部平原以蒸发排泄为主。地下水流网天然形态的总趋势是环绕海岸线展布,流网密度自山前平原向滨海平原由密渐疏。浅层地下水流线,以冲洪积扇顶部为端点呈辐射状,总体流向由山前平原向渤海平原。

深层地下水天然条件下的补给来源主要是西部山区的侧向补给,排泄方式以向下游地区的侧向径流为主,局部地区存在含水层之间的顶托排泄。地下水天然流场的形态总趋势,同浅层水一样,环绕渤海湾呈等势能展布,自山前至滨海,流网由密集变为稀疏。地下水流线呈辐射状流向渤海。

### 3、河北平原第四系地下水循环条件变化分析

近 30 年来河北平原水资源利用程度提高以及大规模地下水开发使地下水循环演化过程叠加了强烈的人为影响,地下水循环条件发生显著变化,主要表现在地下水的补给、径流和排泄条件的改变,对这种变化的深入认识,在地下水可持续开发利用中具有重要意义。

在大规模开发利用地下水条件下,浅层地下水和深层地下水均发生了一系列的变化。区域地下水水位大幅度下降,地下水的排泄方式由原来的侧向流出为主转为以人工开采为主。深、浅层地下水的补排关系发生逆转,深层水由原来的以“天窗”形式补给浅层水和以自流形式溢出地表变为大范围地接受浅层地下水的越流补给。形成了唐山、石家庄、宁晋—柏乡—隆尧、永年等浅层地下水漏斗和廊坊、沧州、冀县—枣强—衡水、保定、魏县等深层地下

水水位降落漏斗。地下水流向的总趋势不变，仍是由山前平原向中部平原及滨海平原流，但在地下水水位降落漏斗区域，地下水流向的天然状态发生改变，地下水由漏斗边缘向中心部位汇流。

河北平原地下水的同位素技术应用，已有刘存富(1999)、张之淦(1984)、孙继朝(2000)及陈宗宇(2001)等人作过相关的研究，取得了大量的成果。本次研究在前人工作基础上，在河北平原布设了三条同位样品剖面(滦县—柏各庄—渤海、满城—沧州—渤海及石家庄—衡水—德州)，取了20组同位样品，目的是对地下水循环条件的变化进行探讨。

3.1 氦、氡、<sup>18</sup>O含量与地下水的年龄分布特征

氦的半衰期为12.43(12.26)年，其测年域一般为50年，因此可用来测定现代水的年龄。根据近20年不同研究者及本次研究在河北平原采集、分析的样品氦分析结果统计，地下水中氦仅在一定深度分布(表3-1)。在山前冲洪积区明显可分辨的氦分布于第Ⅰ、Ⅱ含水岩组，

但表3-1 河北平原地下水中氦含量(浓度)测试结果表

井号	H1	H2	H3	H4	H5	H6	T14
地点	鹿泉	藁城	藁城	晋州	深州	衡水市	任丘
井深(m)	35	50	200	80	200	10.0	27.0
氦(TU)	34.1	20.8	22.3	13.9	11.2	30	4.1
井号	T19	T1	21.8	T6	T22	T24	T25
地点	河间	黄骅	沧县	黄骅	滦南	滦南	滦南
井深(m)	30.0	73~79	20.0	6.0	20	20	12
氦(TU)	6.1	1.9	3.1	9.5	21.6	14.3	8.4
井号	M6	任1	NC-42	沧试6	2井	沧卤2	
地点	孟村	任丘	献县	沧州市	黄骅	黄骅	
井深(m)	30	28	9.0	45	79	36	
矿化度(g/l)	3.17	3.36	1.13	11.5	16.8	58.1	
氦(TU)	10.1	1.26	12.3	<1	1.9	<1	

(注：上表为2002年8月数据。)

在滨海区仅限于第Ⅰ、Ⅱ含水岩组。且总分布趋势是西部高于东部，浅部高于深部，淡水高于咸水，近百年来形成的水主要分布于山前和平原浅部。当水交替好的情况下可达200m左右，向东逐渐递减为50m和30m。中部区和滨海区的深层水为无氦水。在D—<sup>18</sup>O关系图上(图3-1)，浅层水不同深度的水点均落在世界降水线(D=8<sup>18</sup>O+10)附近，且大部分处于该线的右下方，说明河北平原浅层地下水主要是由大气降水补给的，经过强烈的蒸发浓缩作用，形成现在的浅层地下水。据联合国国际原子能委员会(IAEA 1972)对地下水年龄的经验法，河北平原山前平原浅层地下水为近期形成的水，其补给以现代降雨补给为主。中部及滨海平原浅层地下淡水中氦含量在3—20之间，地下水的补给早于山前平原，地下水的补给以新近水占优势，但与“古水”之间有混合作用。

河北平原浅层地下水氦的含量自山前至滨海为降低趋势，在山前平原，浅层地下水中氦

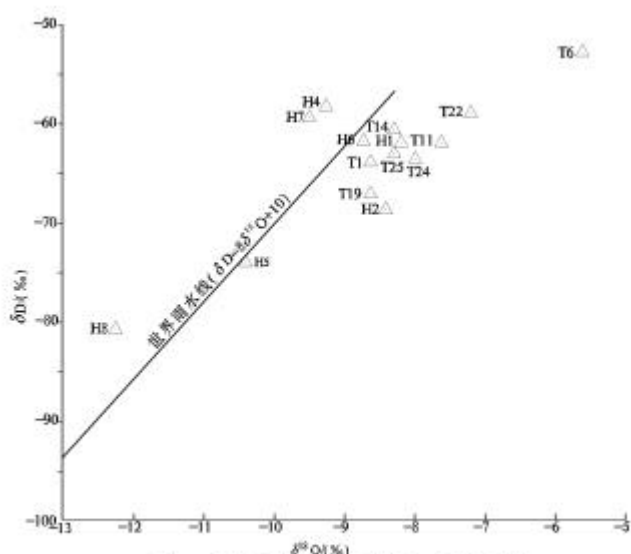


图3-1 河北平原浅层地下水 $\delta D$ - $\delta^{18}O$ 关系图

含量一般在20TU左右，接近于天然地表水的值，中部平原一般在10TU左右，而滨海平原大多低于10TU(图3-2)，这说明浅层地下水在山前平原水循环交替条件较好，近期的大气降水补给可以充分入渗，与较早期的入渗补给形成的地下水相混合，使氡的含量升高，滨海平原的浅层地下水在形成时期上要早于山前平原和中部平原，且其水动力条件较差。在浅层水水位降落漏斗附近氡含量较高，说明了漏斗区的地下水除接受大气降

水补给外，还有大量的漏斗区外的侧向补给，这部分侧向补给的地下水，其主要来源仍为大气降水，但在较大的水力坡度下，这些大气降水未能与当地的浅层地下水充分混合，就流向漏斗区，使漏斗区地下水中含有大量的近期雨水，导致氡含量较高。

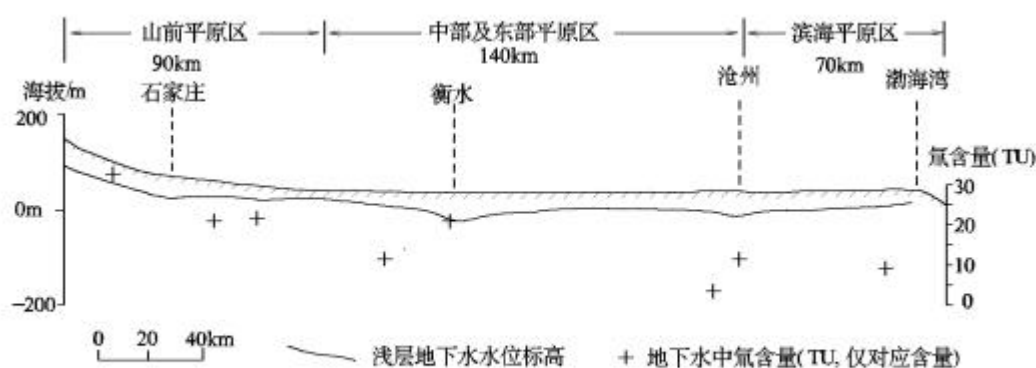


图3-2 河北平原浅层地下水位标高与氡含量关系

### 3.2 地下水 $^{14}C$ 年龄分布特征及规律

$^{14}C$ 的半衰期为5730年，其测年精度一般为 $\pm 500$ 年。我们在研究区取自第四系不同含水岩组25件地下水样品 $^{14}C$ 测定结果显示：由浅到深，由西而东地下水年龄不断增大，最大年龄为2.9万年。在山前平原，地下水的年龄小于1万年，中部平原深层地下水年龄界于1—2万年之间，滨海平原深层地下水年龄大于2万年(图3-3)。这种分布一方面表明第四系地下水系统具有整体性，另一方面表明地下水运移形式以活塞式为主。这种分布提示我们地下水可能储存了2.9万年以来的古气候变化信息。

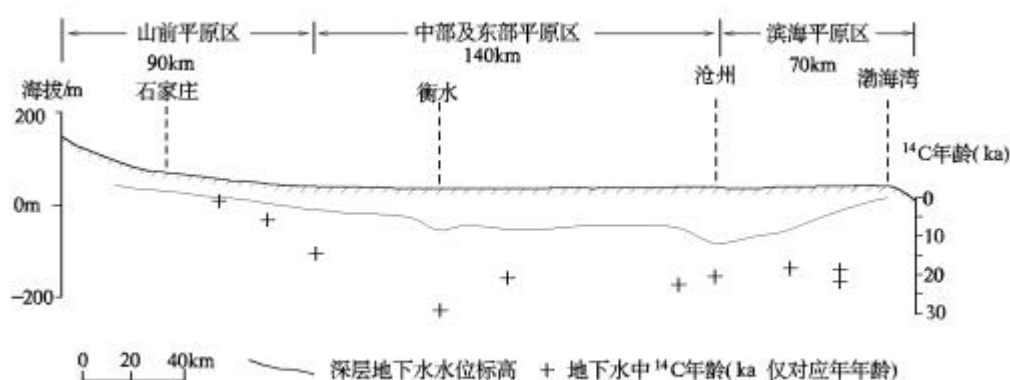
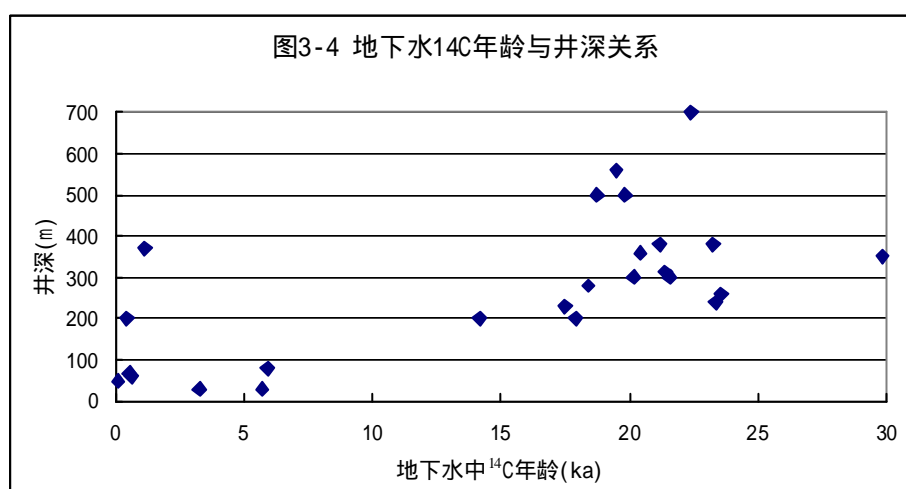


图3-3 河北平原深层地下水位标高与<sup>14</sup>C年龄关系

通过对样品的分析结果来看，深度大于200m的地下水中<sup>14</sup>碳同位素年龄一般在距今15~25ka之间，地质历史时期属于晚更新世。此时期气候寒冷干燥，为主冰期，降水少而且集中，山前平原为洪积扇形成期，中东部平原为古河道形成期，洪泛平原广布。由于海平面低，第三和第四含水组中水流速度加快，水头降低，更新出更老的水。晚更新世末期至全新世海平面的抬升，地下水流速减慢，使得这一时期的地下水较多地存留于含水层中，显示出地质历史时期特征（图3-4）。



<sup>14</sup>碳同位素年龄在深层地下水水位降落漏斗处偏大（图3-3），而深层地下水中氡含量较小，一般小于3TU，因此是不是可以认为深层地下水开采消耗的绝大部分为静储量，其补给主要靠下伏含水层在水头压力之下的顶托补给，以及深层含水层的越流补给量并不象公认的那么大，这还有待于获取更多数据验证。

#### 4. 地下水中环境同位素信息的几点认识

（1）河北平原第四系地下水氡分布表明，山前平原浅层地下水水循环条件较好，水交替较快，漏斗区域地下水接受了大量的近期雨水补给，因此氡含量较高。近几十年水循环深度在山前冲洪积扇区为200m以内，东部地区30~50m。

(2) 地下水 $^{14}\text{C}$ 年龄分布与地下水 $^{18}\text{O}$ 分布存在良好内在联系,共同记录了古气候变化信息,这种分布与该区古气候研究成果具有一致性;地下水 $^{14}\text{C}$ 年龄与分布表明古地下水补给过程受控于古气候、古排泄基准面的变化。

(3) 下水 $^{14}\text{C}$ 年龄表明深层地下水是地质历史时期形成的,天然条件下参与现代水循环较弱,水流以近似活塞流特征为主,在地下水开发后,这种活塞流特征已经发生变化,局部水流系统在漏斗区形成,对开发后的深层水的更新情况应进一步深入研究。

#### 参考文献:

陈宗宇,从华北平原地下水系统中古环境信息研究地下水资源演化,博士论文,2001

刘存富等,河北平原地下水氢、氧、碳、氯同位素组成的环境意义 地学前缘 1997.4(267-274)

陈望和等,河北地下水,北京,地震出版社,1999

张宗祜等,华北平原地下水环境演化,北京,地质出版社,2000

王恒纯等,同位素地质学概论,北京,地质出版社,1990

陈宗宇等,华北地下水古环境意义及古气候变化对地下水形成的影响,地球学报,2001.4

