

北京市平原区地下水循环特征的同位素研究

邢国章¹, 王立发¹, 袁春鸿², 王小冬¹

(1.北京市地质工程勘察院, 北京 100048; 2.山东地矿工程勘察院, 山东济南 250014)

摘要: 同位素技术是研究区域地下水循环规律的主要手段之一。本文对平原区地下水进行了取样分析, 运用同位素技术并结合水文地质条件, 研究了北京市平原区地下水循环演化规律。运用³H和¹⁴C的测年技术确定了地下年龄; 利用D和¹⁸O关系曲线探讨了地下水的起源; 按照是否积极参与了现代水循环的原则将第四系地下水划分为浅层水和深层水; 对浅层水和深层水的更新状况进行了研究。研究表明, 浅层水广泛分布于北京平原区, 径流条件好, 更新快; 深层水主要分布于永定河、潮白河冲洪积扇下部及冲洪积平原的深部地区, 补给条件相对差, 与现代大气降水联系弱, 径流条件差, 更新慢。

关键词: 北京平原区; 同位素; 地下水年龄; 更新速率; 地下水循环

中图分类号: P641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-1903 (2013) 01-0023-05

0 引言

同位素技术作为核科学技术和和平利用的重要内容, 在确定地下水来源及组成、揭示含水层之间的水力联系、示踪天然水运动具有重要作用^[1-3], 尤其在定量评价地下水更新速率及年龄等方面具有独特作用。同位素分析技术已成为水文学和水文地质学的现代研究方法之一^[4]。

近20多年来, 我国已将环境同位素技术大量地、成功地应用于研究区域地下水循环规律。如关秉钧^[5]等(1985)利用³H、¹⁴C、¹³C探讨了北京地区地下水运动规律; 刘存富等^[6,7,8](1990, 1993, 1997)在华北地区开展了地下水年龄、古补给和古流向研究; 张之淦等^[9](1987)利用同位素技术研究了河北平原第四系地下水年龄、水流系统; 陈宗宇等^[10,11]在华北平原利用同位素技术开展了古补给和古气候信息研究。李向全^[12]等运用构造控水分析、水化学同位素等方法, 对宁南“南北古脊梁”岩溶裂隙水系统进行了深入的研究与分析, 基本查明了岩溶水的循环特征。聂振龙^[13](2004)应用同位素与水化学方法对黑河干流中游盆地地下水循环及更新性研究进行了探索性研究。

作为北京地下水研究的重要基础性工作, 研究平原区地下水的循环演化特征, 对指导地下水的合理开发利用、有效保护具有重要的意义。本文运用同位素技术研究

了北京平原区地下水——主要是第四系地下水循环演化特征。

1 研究区概况

北京平原区位于华北平原区东北端, 面积6032km², 地理位置为北纬39° 30′~40° 30′, 东经115° 45′~117° 10′。地形西北高、东南低, 西部和北部为太行山脉和燕山山脉。气候属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 多年平均降水量600mm左右。北京平原主要由永定河、温榆河、潮白河、蓟运河、拒马河五大河流冲、洪积作用形成的冲洪积扇组成。第四系孔隙水赋存于各冲洪积扇的卵砾石、砂含水层中, 具有冲洪积扇地下水赋存的一般规律: 从山前向平原, 沉积物的颗粒由大变小, 含水层结构由单一转变为多层, 渗透性和含水层富水性逐渐减少。北京平原地下水主要接受大气降水入渗、山区侧向流入、河流和灌溉入渗补给, 其中, 大气降水是主要的补给来源; 天然条件下, 地下水主要消耗于蒸发和侧向流出, 蒸发主要发生于潜水埋深小于4m的区域, 目前人工开采已经成为其主要排泄方式; 地下水径流方向基本与地貌变化方向一致, 由山前向平原, 由北西流向南东, 径流强度逐渐减弱, 在漏斗分布区地下水流场发生有一定变化。

2 样品采集及测试

2003~2005年在北京市平原区进行了同位素取样,共45组,主要采集第四系松散孔隙水,另有少量基岩裂隙水,取样位置为永定河与潮白河冲洪积扇轴部地带。测试工作由中国地震局地质研究所国家重点实验室完成, O同位素利用CO₂平衡方法分析精度0.2‰; H同位素利用锌还原方法,分析精度2‰,通过质谱测定以SMOW标准表示。¹⁴C采用Quantulus-1220 (LKB) 低本底液闪仪测量,半衰期采用5568年。

3 样品年龄计算及确定

地下水的年龄利用³H和¹⁴C的通用测年技术计算获得。地下水的³H年龄通过FLOW PC 3.1 程序(Malo szewski and Zuber, 1996) 来定量估算,模型为指数活塞混合模型,模型参数 η 采用迭代拟合法确定。¹⁴C 年龄根据公式 $t=-8267\ln(A_{\text{样}}/A_0)$ 计算,其中t是距今的年龄(aBP), $A_{\text{样}}$ 是测试的总溶解无机碳的¹⁴C含量, A_0 是补给时初始总溶解无机碳的¹⁴C含量。在测年中使用华北平原普遍采用的¹³C混合模型结果作为¹⁴C校正年龄的最终结果。

综合本次同位素测试结果、样品地下水年龄计算结

果、前人研究成果,认为³H含量大于6个TU、¹⁴C (PMC) 含量相对高的样品地下水为含有核爆氦,称为含有核爆氦的现代水(以下简称现代水),年龄依据3H年龄确定;³H含量小于6个TU、¹⁴C (PMC) 含量相对小的样品地下水未含核爆氦,称为未含核爆氦的“古水”(以下简称“古水”),依据¹⁴C校正年龄确定地下水年龄;³H检测值大于6TU但¹⁴C (PMC) 含量相对较低样品为现代水和“古水”混合的水,称之为混合水,不做具体年龄确定。其中第四系地下水年龄确定结果见表1。

4 样品同位素统计分析

对样品³H、¹⁴C含量随埋藏深度的统计证实存在有垂直分带性。永定河地下水系统,样品埋藏深度小于110m的第四系孔隙水³H含量均大于6TU,平均值为23.2TU,¹⁴C (PMC) 含量均大于58%,主要是现代水;埋藏大于120m的第四系孔隙水³H含量小于6TU,¹⁴C (PMC) 含量均小于40%,主要是“古水”。对于潮白河地下水系统,样品埋藏深度小于80~185m的地下水,³H含量均大于15TU,平均值为20.05TU,¹⁴C (PMC) 含量均大于50%,主要是现代水;取样的深度大于150~300m 的地下水,³H含量小于5TU,

表1 第四系地下水年龄及主要同位素含量表

编号	³ H 含量 (TU)	¹⁴ C 含量 (PMC)	年龄 (a)	水样 类型	编号	³ H 含量 (TU)	¹⁴ C 含量 (PMC)	年龄 (a)	水样 类型
T2-03	25.3	58.04	17	现代水	T1-03	3.1	20.47	11111	古水
T5-03	28.5	90.3	≤ 5		T3-03	0.5	24.16	8290	
T7-03	22.9	68.75	19		T6-03	4.7	13.66	13275	
T8-03	30.6	86.12	≤ 5		T15-05	2.97	34.52	7518	
T11-03	20.8	69.74	21		T16-05	5.86	38.03	6738	
T12-03	15.6	75.24	25		T17-05	5.04	36.92	6452	
T14-03	32.1	79.83	12		T10-03	18.5	6.09		混和水
T2-04	17.92	54.93	21		T3-04	9.75	30.61		
T8-04	24.46	92.32	≤ 5		T4-04	12.07	31.95		
T9-04	19.47	62.67	≤ 5		T5-04	19.07	7.21		
T10-04	21.57	75.11	≤ 5		T6-04	15.91	26.06		
T14-04	15.91	91.85	23		T12-04	11.18	9.22		
T2-05	14.23	69.96	≤ 5		T13-04	14.72	33.36		
T3-05	30.49	97.43	7		T15-04	15.02	3.3		
T8-05	20.24	现代碳	17		T10-05	9.34	46.79		
T9-05	11.47	60.51	27		T11-05	8.51	7.52		
T12-05	23.2	72.7	14						
T13-05	9.81	60.87	30						
T14-05	15.02	3.3	17						

^{14}C (PMC) 含量均小于22%，主要是“古水”。

地下水样品 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 亦有一定的分区性。现代水 δD 值-69‰~-55‰， $\delta^{18}\text{O}$ 值为-9.7‰~-6.6‰；“古水” δD 值为-78‰~-61‰， $\delta^{18}\text{O}$ 值为-11.4‰~-9.1‰。根据样品氢氧稳定同位素测试数据做常规的 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图，见图1。

由图1可见，样品 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均落在全球雨水线附近，说明不论是现代水、“古水”还是基岩裂隙水均起源于大气降水。结合地下水年龄，现代水样品D和 ^{18}O 组成较重、相关分析线偏离全球雨水线程度较大，多为近50年以来补给的大气降水，地下水在补给过程中经过不同程度的蒸发影响。

“古水” ^{14}C 年龄为6500~13000年之间，地下水同位素组成较轻，是在比现代寒冷的气候条件下由大气降水入渗形成的；另据北京冰川研究历史，晚更新世末期大约15000年左右，北京地区气候相对开始转暖，百花山冰期（大理冰期）的第二阶段进入末期，冰川开始消融，第四系全新统地层开始沉积，“古水”样品的年龄与此地质年代大致对应，初步确定样品的“古水”为末次冰期后所补给的水。

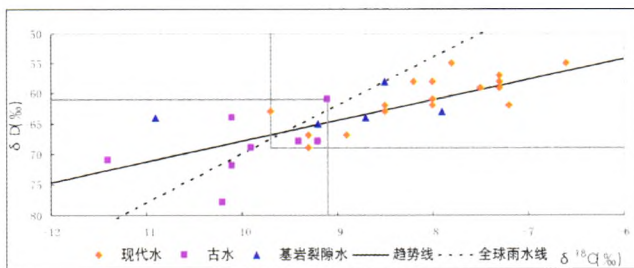


图1 北京平原区地下水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系相关分析曲线图

5 第四系地下水浅层水、深层水的划分

依据同位素的测试数据做出了永定河、潮白河地下水系统 ^3H 、 ^{18}O 、D含量在取样剖面上的分布曲线图，其中 ^3H 含量剖面图见图2、3。

同位素剖面图及上述年龄、补给特征表明，在永定河、潮白河冲洪积扇的上部、中部及永定河冲洪积扇下部埋深小于150~180m、潮白河冲洪积扇下部埋深小于220~250m的含水层中，地下水具有相同的同位素特征： ^3H 含量在9TU~33TU、 ^{14}C (PMC) 大于55%， δD 值-63‰~-55‰， $\delta^{18}\text{O}$ 值为-8.5‰~-6.6‰，D和 ^{18}O 组成较重，年龄小于50年，样品均为现代水取样点，来源于近50年来补给的大气降水，水循环交替强。

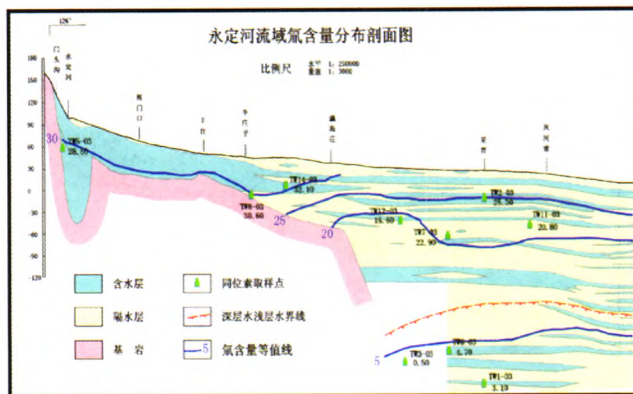


图2 永定河地下水系统氚含量剖面图

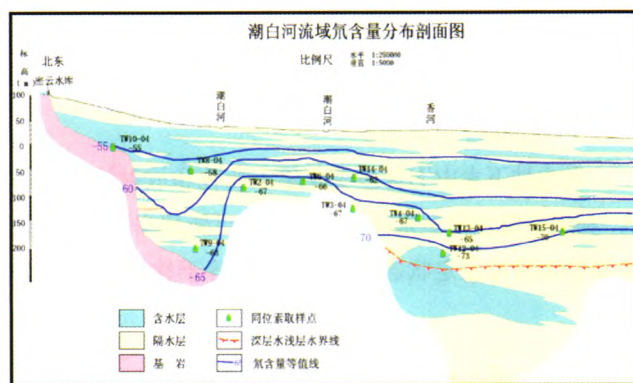


图3 潮白河地下水系统氚含量剖面图

在永定河冲洪积扇下部150~180m以下、潮白河冲洪积扇下部220~250m以下的深部，地下水具有相同的同位素特征： ^3H 含量小于5TU、 ^{14}C (PMC) 小于40%，年龄在6500~13000年左右， δD 值为-78‰~-64‰， $\delta^{18}\text{O}$ 值为-10.2‰~-9.2‰，D、 ^{18}O 组成较轻，补给来源于末次冰期后补给的大气降水，水循环交替较差。

根据北京市地下水的开采情况，结合同位素特征、剖面分布图、取样深度、水循环信息等，按照是否积极参与现代水循环的划分原则，以现有的资料分析，对北京市平原区第四系孔隙水类型进行了浅层水、深层水的初步划分，做出了平原区浅层水、深层水分布图，见图4。浅层水、深层水在平面上以通州宋庄—通州县城—通州马驹桥—大兴榆垓一带为界线，界线西北部及界线西南的永定河冲洪积扇150~180m和潮白河冲洪积扇220~250m以上的浅部，主要是浅层水，地下水参与现代水循环积极；界线东南部的深部为深层水，地下水参与现代水循环能力较差。

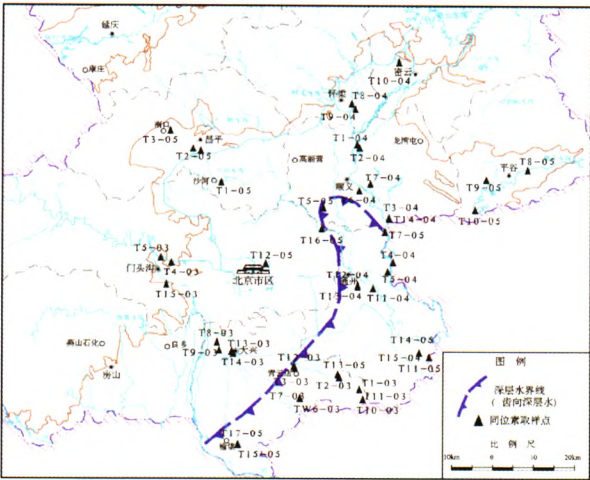


图4 北京平原区浅层水、深层水界线平面分布图

6 地下水更新特征

(1) 浅层水更新速率

考虑地下水中³H含量受年输入变化和放射性衰变影响,利用全混合模型来计算浅层水的更新速率(假设系统1952年以前是稳定状态,即水的输入等于输出),计算公式为:

$$A_{gwi} = (1 - R_r) A_{gwi-1} e^{-\lambda} + R_{ri} A_{0i}$$

Rr——年更新速率, Ag——地下水的³H含量, A0——输入水的³H含量, λ——放射性常数(³H=0.05626/a), i——时间(年)即从0~54(计算年与初始输入年的差,初始年定为1952年)。

由于输出计算结果存在多解,结合取样深度、取样位置及该位置具体的水文地质条件进行分析确定,编制了平原区浅层水的更新速率图,见图5。由图可知北京浅层水更新速率在2%~10%左右,从西北向东南由冲洪积扇顶部向下部逐渐减少,总体更新情况好,地下水开放性较好,循环积极。

(2) 深层水更新特征

深层水的径流速率在一定程度上表现了其更新特性,根据下式计算深层古水取样点间的径流速率:

$$V = \frac{1}{\mu_e} (\Delta L / \Delta T)$$

其中V——径流速率, ΔL——距离差, ΔT——时间差, μe——含水层有效孔隙度。

计算结果见表2。可见深层水取样点年龄相差较大,

径流条件及补给条件较差,径流速率多在0.005km/a以下,地下水系统封闭性强,更新能力较弱。

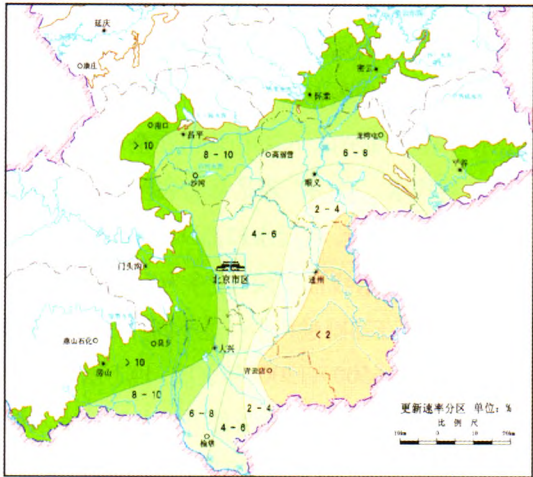


图5 北京平原区浅层水的更新速率图

表2 北京平原区深层水径流速率计算结果表

编号	年龄(a)	编号	年龄(a)	距离(m)	时间差(a)	流速(m/a)
TW3-03	8290	TW6-03	13275	7790	4985	0.225
TW3-03	8290	TW1-03	11111	1112	2821	0.585
TW7-05	9595	TW5-05	12831	1637	3236	0.75
TW16-05	6738	TW5-05	12831	547	6093	0.135

7 主要成果与结论

(1) 运用³H和¹⁴C的通用测年技术计算地下水的年龄。永定河地下水系统埋藏深度小于110m、潮白河地下水系统埋藏深度小于80~185m的第四系孔隙水,主要是含有核爆氙的现代水;埋藏深度分别大于120m、150~300m的地下水主要是“古水”。

(2) 样品δD、δ¹⁸O关系表明,平原地下水均起源于大气降水。现代水多为近50年以来补给的大气降水,补给过程中经过不同程度的蒸发影响。“古水”为末次冰期后、较现代寒冷的气候条件下由大气降水入渗形成的。

(3) 按是否积极参与现代水循环的划分原则对平原区第四系孔隙水进行了浅层水、深层水的初步划分,在平面上以通州宋庄—县城—马驹桥—大兴榆堡一带为界线,界线西北部及界线西南的永定河冲洪积扇埋深小于150~180m、潮白河冲洪积扇埋深小于220~250m,其地下水主要是浅层水;界线东南部的深部为深层水。

(4)研究了浅层水、深层水的更新状况。北京浅层水更新速率在每年2%~10%左右,地下水系统开放性较好,循环积极;深层水样品年龄相差较大,径流速率多在0.005km/a以下,径流条件及补给条件较差,地下水系统封闭性强,更新能力较弱。

参考文献

- [1] 王恒纯.同位素水文地质概论[M].北京:地质出版社,1991.145~167.
- [2] 万军伟,刘存富.同位素水文学理论与实践.武汉:中国地质大学出版社,2003.
- [3] 聂振龙,陈宗宇,申建梅等.应用环境同位素方法研究黑河源区水文循环特征.地理与地理信息科学,2005,21(1):104~108.
- [4] Ian D.Clark,Peter Fritz.Environmental Isotopes in Hydrogeology.CRC Press,1999.
- [5] 关秉钧.用环境同位素氘、 ^{14}C 、 ^{13}C 探讨北京地区地下水运动规律,水文地质技术方法,1985,(12):1~6.
- [6] 刘存富.地下水 ^{14}C 年龄校正方法-以河北平原为例.水文地质工程地质,1990(3):4~8.
- [7] 刘存富,王佩仪,周炼.河北平原第四系地下水 ^{36}Cl 年龄初探.中国同位素水文地质学之进展(1988-1993),天津大学出版社,1993,114~118.
- [8] 刘存富,王佩仪,周炼.河北地下水氢、氧、碳、氯同位素组成的环境意义.地学前沿,1997,4(1-2):267~274.
- [9] 张之淦等.河北平原第四系地下水年龄、水流系统及咸水成因初探=石家庄至渤海湾同位素水文地质剖面研究.水文地质工程地质,1987,(4):1~6.
- [10] 陈宗宇,张光辉,徐家明.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,1998,19(4):338~345.
- [11] 陈宗宇,张光辉,聂振龙等.中国北方第四系地下水同位素分层及其指示意义.地球科学,2002,27(1):97~103.
- [12] 李向全,张莉,于开宁.西北干旱区深层岩溶地下水系统的水化学-同位素研究.吉林大学学报(地球科学版)[J].2003.33(4):524~529.
- [13] 聂振龙,陈宗宇,申建梅等.利用环境同位素示踪黑河干流源区水文循环,地理与地理信息科学[J].2004.4.

Isotopic Study on the Groundwater Circulation Features of the Plain Area of Beijing

XING Guozhang¹, WANG Lifa¹, YUAN Chunhong², WANG Xiaodong¹

(1. Beijing Institute of Geological and Prospecting Engineering, Beijing 100048;

2. Shandong Provincial Geo-Engineering Exploration Institute, Jinan 250014)

Abstract: Isotope technology is one of the principal means on the regional groundwater circulation research. Based on samples of the groundwater, using isotope technology and combining hydrogeological condition analysis, this paper focuses on the groundwater circulation rule on Beijing plain area. In the paper, the groundwater age is calculated by using the dating techniques of ^{14}C and ^3H , and the groundwater source is analyzed by analyzing groundwater relation curves of D and ^{18}O . According to whether actively participated in the modern water circulation, the Quaternary aquifers in Beijing plain area are divided to shallow aquifer and deep aquifer, then the recovery situation of shallow and deep aquifers are studied. The result shows that the shallow water widely distributes in Beijing plain area, its runoff condition and recovery are relatively good; the deep water mainly distributes in bottom of alluvial-pluvial fans for the Yongding River and the Chaobai River, the recharge conditions are relatively poor, with the little interconnection with modern atmospheric rainfall.

Keywords: Beijing plain area; Isotope; Groundwater age; Recovery rate; Groundwater circulation