

# 北京市永定河流域地下水 $^{14}\text{C}$ 年龄的初步分析

王新娟<sup>1,2)</sup>, 周训<sup>1)</sup>

1) 中国地质大学水资源与环境学院, 北京, 100083; 2) 北京市地质工程勘察院水资源研究所, 100037

**内容提要:** 应用同位素方法初步分析北京郊区永定河流域地下水的演化特点。沿永定河冲洪积扇地下水流动方向布置取样剖面, 共有取样点14个, 对采集的水样进行 $^{14}\text{C}$ 和氦含量分析, 并确定地下水同位素年龄。浅层孔隙水的 $^{14}\text{C}$ 年龄的变化范围为730~4900a, 深层孔隙水为13420~22480a;  $^{14}\text{C}$ 年龄在垂直方向上由浅部至深部逐渐增大, 最大变化幅度为从3010a增至22480a; 浅层孔隙水的氦含量都在14.99~30.56TU之间, 深层孔隙水大部分在0.51~4.71TU之间。运用地下水 $^{14}\text{C}$ 和氦年龄在垂向和水平方向变化的结果, 验证了地下水的流向并计算了地下水的流速变化范围为5.02~62.63m/a, 从山前至平原浅层地下水径流速度逐渐变小, 反映了地下水水平径流强度逐渐减弱, 地下水交替逐渐变差, 浅层孔隙水以垂向交替为主, 深层孔隙水以水平径流为主。

**关键词:** 地下水;  $^{14}\text{C}$ 年龄; 氦; 同位素; 北京

北京市地处半干旱地区, 是世界上缺水城市之一。近年来, 北京市遭遇了连续5年干旱, 已进入建国以来最严重的枯水期。因此, 开展华北平原特别是北京平原地区地下水可持续利用的研究, 具有十分重要的意义。同位素水文学是20世纪60年代发展起来的, 同位素技术在研究地下水的起源, 判定地下水的年龄、流速、方向及补给量, 了解地下水与地表水的相互转化和不同含水层之间的相互联系, 分析地表水对地下水的污染情况等方面具有特殊的作用(刘存富, 1984)。利用同位素技术可以获得常规方法所不能取得的关键数据, 并节省投资, 国外已广泛应用同位素技术分析水文水资源领域的许多问题, 例如Fonts等(1976)对巴黎盆地地下水系统的水化学研究。我国也在同位素技术应用于水文水资源方面开展了许多工作(万军伟等, 2003; 马致远, 2004), 例如陆亚庆等对银川地区第Ⅱ含水岩组(承压水)取水样进行 $^{14}\text{C}$ 研究, 对地下水的 $^{14}\text{C}$ 年龄进行了校正, 并对地下水的年龄、循环、流速、补给关系等进行了研究(万军伟等, 2003)。本次研究工作是沿永定河流域的一个剖面采集地下水样品, 通过测定 $^{14}\text{C}$ 年龄和氦含量研究地下水的循环和演化。

永定河冲洪积扇地处华北平原的西北端, 地势由西北向东南倾斜, 地面高程100~45m, 冲洪积扇顶部地形坡度3‰, 至南部坡度为1‰。第四系沉积物

的分布主要受永定河河道变化的影响, 在八宝山以北地区第四系沉积厚度可达200m以上。含水层的补给包括大气降水、河谷潜流、山前侧向径流、河渠渗漏、灌溉回归水及人工回灌等。植被吸收、蒸发、包气带消耗、人工开采等是地下水系统的排泄方式。依据含水层的岩性和结构可将研究区地下水系统划分成3个子系统: ①单层砂卵石储水区, 位于莲花池—昆明湖以西, 为冲洪积扇的顶部, 含水层渗透性能好, 渗透系数300~500m/d。②2~3层含卵石砂砾石储水区, 主要位于门头村—八里庄—陶然亭—马家堡一带, 渗透系数50~300m/d。③多层中细砂及含砾砂储水区, 分布在上述地区以东和以南的广大地区, 渗透系数30~50m/d。

## 1 同位素样品与测试

从门头沟麻峪至大兴凤河营水厂大体上沿一个剖面采集地下水样品, 取样剖面与永定河成斜交, 基本上是沿永定河冲洪积扇地下水的流向布置了15组取样点, 如图1所示。取样层位既有浅层孔隙水, 又有深层孔隙水, 还有隐伏基岩地下水。

样品由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测定, 采用液体闪烁计数法, 测定结果的校正采用树轮校正法, 测试精度可达1%~2%。水样测试结果列于表1。

注: 本文为中国地质调查局国土大调查项目“华北平原地下水可持续利用调查评价”(编号: 20031040002)资助成果。

收稿日期: 2004-10-19; 改回日期: 2005-08-17; 责任编辑: 周健。

作者简介: 王新娟, 女, 1973年生, 工程师, 中国地质大学(北京)水资源与水文学专业博士生, 现从事水工环评价与模型研究。通讯地址: 100037, 北京市地质工程勘察院水资源研究所, Email: wangxinjuan@sohu.com。

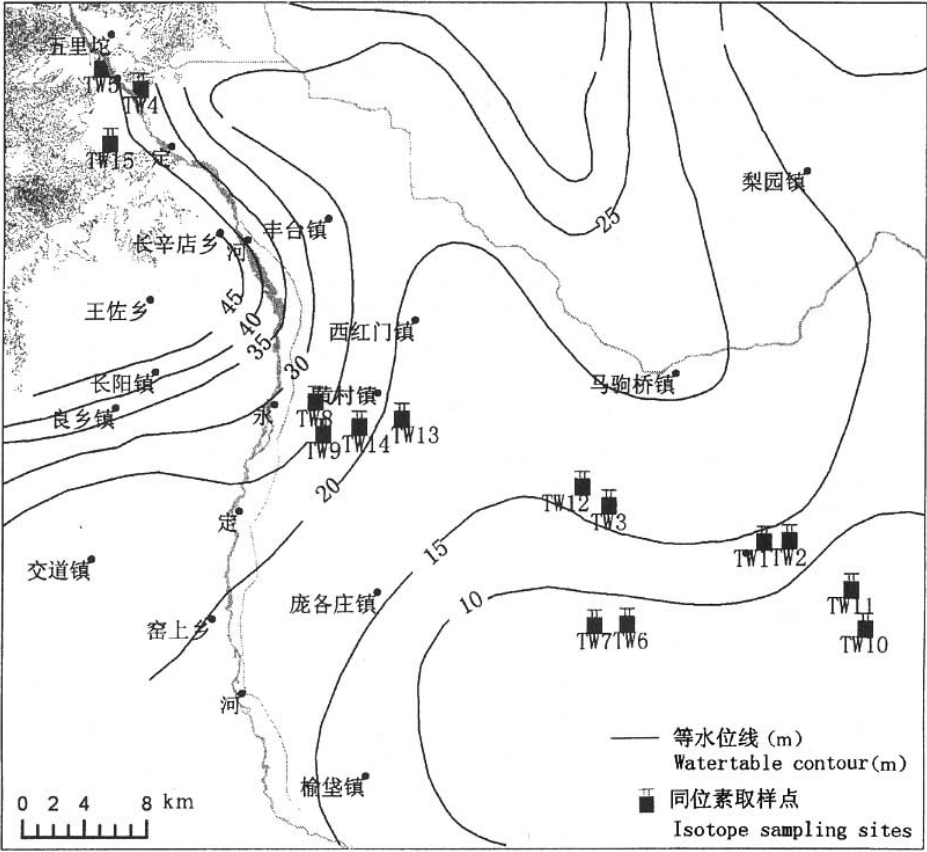


表 1 同位素测定结果  
Table 1 Results of isotopic compositions

编号	取样地点	含水层类型	取样深度(m)	年龄(a)	树轮校正(Cal a BP)	氚含量(TU)
TW4	北京广宁村	基岩裂隙水	147.2~216.0	3150±80	3370±90	15.32±2.42
TW9	芦城水务站南1800m	基岩裂隙水	30~300	4260±90	4840±110	27.21±2.59
TW11	凤河营半壁店村西	浅层孔隙水	10~60	2895±70	3010±130	20.80±2.46
TW13	大兴水厂(黄村)	浅层孔隙水	20~40	1810±70	1715±100	32.08±2.55
TW14	大兴义和庄	基岩裂隙水	50~500	3510±80	3800±105	20.96±2.47
TW1	采育北营葡萄园01	深层孔隙水	272~284	12740±140	15380±590	3.11±2.32
TW2	采育北营葡萄园02	浅层孔隙水	20~40	4370±75	4900±90	25.26±2.5
TW3	青云店人民政府院内	深层孔隙水	80~100	11410±120	13420±300	0.51±2.29
TW5	麻峪	浅层孔隙水	0~20	820±70	730±60	28.46±2.52
TW6	安定镇东南	深层孔隙水	80~305	15990±160	19080±350	4.71±2.33
TW7	安化集团2号墙外西边	浅层孔隙水	20~40	3010±80	3220±130	25.26±2.5
TW8	芦城水务站院内	浅层孔隙水	10~50	1200±70	1110±90	30.56±2.54
TW12	青云店粮库院内	浅层孔隙水	20~40	2285±75	2330±90	15.58±2.42
TW10	凤河营水厂	深层孔隙水	110~294	22480±445		18.52±2.42

2 结果与分析

2.1 地下水<sup>14</sup>C年龄垂向变化

从同位素取样剖面图上可看出(图2),地下水

<sup>14</sup>C年龄随深度增加而增大,一般深层孔隙水比浅层孔隙水大。例如在青云店取样点,浅层水样 TW12 (<sup>3</sup>H为15.58TU)<sup>14</sup>C年龄(校正)为2330a,即为现代的人渗水与“古水”的混合水,深层水样 TW3(<sup>3</sup>H为

0.51TU)<sup>14</sup>C年龄(校正)为13420a,以“古水”为主,深层水比浅层水的年龄大11090a。在安化集团取样点,浅层水样 TW7(<sup>3</sup>H为22.90TU)<sup>14</sup>C年龄(校正)为3220a,即为现代入渗水与“古水”的混合水,深层水样 TW6(<sup>3</sup>H为4.71TU)<sup>14</sup>C年龄(校正)为19080a,以“古水”为主,深层水比浅层水的年龄大15860a。在采育取样点,浅层水样 TW2的<sup>14</sup>C年龄(校正)为4900a(<sup>3</sup>H为25.26TU),即为现代入渗水与“古水”的混合水,深层水样 TW1(<sup>14</sup>C年龄(校正)为15380(<sup>3</sup>H为3.11TU),以“古水”为主,深层水比浅层水的年龄大10480a。

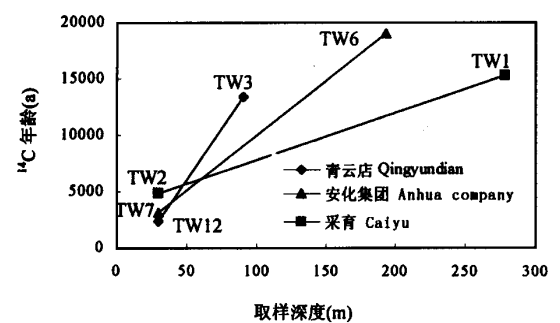


图 2 地下水<sup>14</sup>C年龄的垂直变化规律  
Fig.2 Vertical changes in groundwater <sup>14</sup>C age

2.2 地下水<sup>14</sup>C年龄的水平变化

沿着永定河冲洪积扇地下水的流向自西北向东南,<sup>14</sup>C年龄(校正)逐渐增大,如图3所示。对于浅层孔隙水,在门头沟麻峪的水样 TW5的<sup>14</sup>C年龄(校

正)为730a,在芦城水务站院内的水样 TW8为1110a,在大兴水厂(黄村)的水样 TW13为1715a,在青云店粮库院内的水样 TW12为2330a,在安化集团2号墙外西边的水样 TW7为3220a,在采育北营葡萄园浅层的水样 TW2为4900a。对于深层孔隙水,在青云店人民政府院内的水样 TW3的<sup>14</sup>C年龄(校正)为13420a,在安化集团院内的水样 TW6为19080a,在采育的水样 TW1为15380a,在凤河营水管站的水样 TW10为22480a,整体上的变化趋势是逐渐增大。在采育取样点出现异常,初步判断是由于深层取水使浅层水与深层水之间建立了水力联系,浅层水补给到深层水中使后者的年龄变小。不论是浅层水还是深层水总的变化特点与研究区水文地质条件基本一致。

<sup>14</sup>C 年龄在水平方向的变化是地下水从冲洪积扇的上部到下部水平径流的反应。从另一个角度来说,在径流过程中,地下水水化学成分也应该有相应的变化特点。下面以 Ca<sup>2+</sup> 为例研究<sup>14</sup>C年龄与 Ca<sup>2+</sup> 之间的相关关系,如图4所示。从图4可看出,不论是基岩裂隙水,浅层孔隙水还是深层孔隙水,地下水<sup>14</sup>C年龄与 Ca<sup>2+</sup> 之间呈较好的线性相关关系。分别对浅层孔隙水、基岩裂隙水和深层孔隙水求出其<sup>14</sup>C年龄与 Ca<sup>2+</sup> 之间的相关系数:ρ<sub>浅</sub> = -0.8295, ρ<sub>基</sub> = -0.8128, ρ<sub>深</sub> = -0.8460,总体的相关系数 ρ = -0.8134,两者呈负相关,既随着<sup>14</sup>C年龄增加 Ca<sup>2+</sup> 含量降低,从冲洪积扇的上部到下部由于地下水的水平径流,<sup>14</sup>C不断衰变,地下水年龄逐渐升高。可见,同位素与水化学特征可以相互验证。

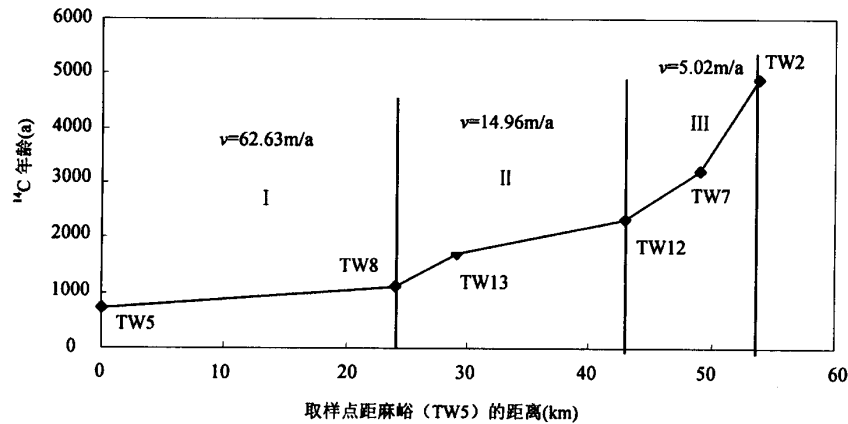


图 3 地下水<sup>14</sup>C年龄水平变化规律  
Fig.3 Horizontal changes in groundwater <sup>14</sup>C age

I — 冲洪积扇上部; II — 冲洪积扇中部; III — 冲洪积扇下部; v — 径流速度

I — Top of pluvial and alluvial fan; II — middle of pluvial and alluvial fan; III — bottom of pluvial and alluvial fan; v — water flow velocity

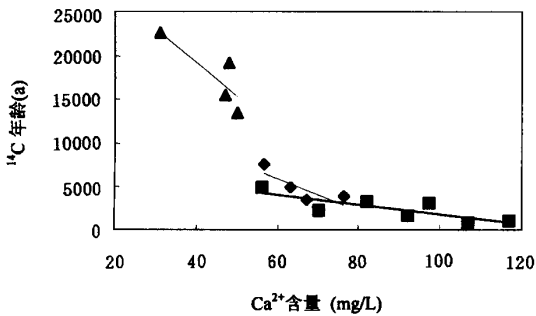


图 4  $^{14}\text{C}$  年龄与  $\text{Ca}^{2+}$  之间的相关关系  
Fig. 4 Correlations between groundwater  $^{14}\text{C}$  age and  $\text{Ca}^{2+}$  contents

◆—基岩裂隙水; ■—浅层孔隙水; ▲—深层孔隙水;  
◆—Bedrock fracture water; ■—shallow pore water;  
▲—deep pore water

2.3 地下水中氦含量在垂向上的变化

在冲洪积扇的中上部,浅部的孔隙水中的氦含量普遍高于深部的基岩裂隙水。例如,在芦城水务站取样点,取样深度 0~20m 时(芦城水务站院内 TW8), $^3\text{H}$  为 30.56TU,取样深度 30~300m 时(芦城水务站南 1800 米 TW9), $^3\text{H}$  为 27.21TU;在大兴取样点,取样深度 20~40m 时(大兴黄村水厂 TW13), $^3\text{H}$  为 32.08TU,取样深度 50~500m 时(大兴义和庄 TW14), $^3\text{H}$  为 20.96TU。但不论是浅部的松散沉积物中的孔隙水还是深部的基岩裂隙水都属于大气入渗水,其氦含量都在 5~40TU 之间,属于新近入渗水与“古水”形成的混合水。在冲洪积扇的中下部,地下水都属于松散沉积物孔隙水,但浅层水与深层水之间的氦含量相差一个到两个数量级,浅层水的氦含量都在 5~40TU 之间,而深层水的氦含量在 0~5TU 之间。例如,在青云店取样点,取样深度 20~40m 时(青云店粮库院内 TW12), $^3\text{H}$  为 15.58TU,即为现代的入渗水与“古水”的混合水,取样深度 80~100m 时(青云店人民政府院内 TW3), $^3\text{H}$  为 0.51TU,以“古水”为主;在安化集团取样点,取样深度 20~40m 时(安化集团 2 号墙外西边 TW7), $^3\text{H}$  为 22.90TU,即为现代的入渗水与“古水”的混合水,取样深度 80~305m 时(安化集团院内 TW6), $^3\text{H}$  为 4.71TU,以“古水”为主;在采育取样点, TW2 点,取样深度 20~40m 时, $^3\text{H}$  为 25.26TU,即为现代的入渗水与“古水”的混合水,在 TW1 点,取样深度 272~284m 时, $^3\text{H}$  为 3.11TU,以“古水”为主。如图 5 所示。

2.4 地下水中氦含量在水平方向的变化

浅层孔隙水氦含量在水平方向的变化如图 6 所示。氦含量在水平方向逐渐降低,但是并不严格递减,而是在总体下降的情况下在趋势线上下波动。取样剖面上整个浅层孔隙水的氦含量都在 15~35TU 之间,都属于 40a 以内由大气降水入渗形成的现代水。说明在整个冲洪积扇范围内大气降水与地下水之间的水力联系密切,水循环以垂直交替为主。氦含量的总体降低是因为大气降水由山前至平原逐渐减少,氦含量的波动由局部的大气降水的强度变化造成。即总的来说浅层地下水垂向交替强度由山前至平原逐渐减弱。

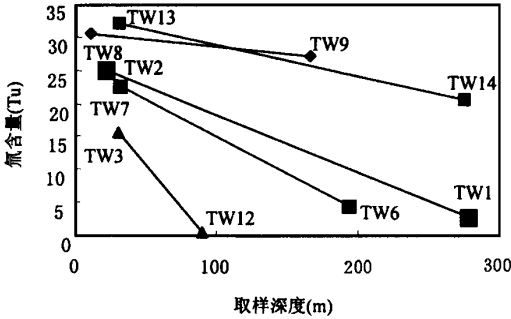


图 5 氦在垂向上的变化  
Fig. 5 Vertical changes in tritium

3 地下水流速的估算

在冲洪积扇的上部多为砾石、卵石,含水层透水性,地下径流强烈;向下部,过渡为砾石及砂为主,没入平原的部分,则为砂与粘性土互层。随着含水层颗粒变细,其透水性变差,地下径流变缓。在剖面上量出两个取样点之间的距离比上两点地下水同位素年龄之差,就可以求得地下水的平均流速。按照水文

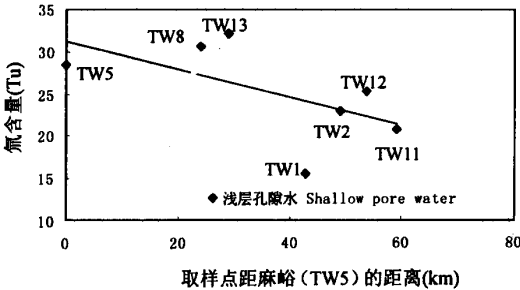


图 6 氦含量在水平方向的变化  
Fig. 6 Horizontal changes in tritium

地质条件把研究区内永定河冲洪积扇分为3个区:对于浅层地下水(图3),从麻峪到芦城水务站取样点是冲洪积扇的上部,为单一潜水含水层,由<sup>14</sup>C 年龄求出的地下水径流的平均速度为62. 63m/a;由芦城水务站1至青云店粮库院内取样点是冲洪积扇的中部,为双层含水层,由<sup>14</sup>C年龄求出的浅层地下水平均径流速度为14. 96m/a;由青云店粮库院内至风合营水管站是冲洪积扇的下部,为多层含水层,由<sup>14</sup>C年龄求得的浅层地下水平均径流速度为5. 02m/a。可以看出从山前至平原浅层地下水径流速度逐渐变小,反映地下水水平径流强度逐渐减弱。整个冲洪积扇的平均径流速度为27. 54m/a,表明地下水径流条件较好。

对于深层地下水,位于取样剖面下游,从青云店人民政府院内至安化集团取样点,地下水径流速度为1. 22m/a,从安化集团院至凤河营水管站,地下水径流速度为2. 00m/a,深层地下水的平均径流速度为1. 68m/a。结合上述浅层地下水的径流速度估算结果,说明深层地下水径流条件很差,应慎重开采。

4 地下水水化学特征

取样剖面上地下水的水化学和同位素特征应存在着一定的联系。由冲洪积扇的扇顶至扇缘,地下水

的矿化度应逐渐升高。具体来说,地下水的 Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 应该逐渐降低,Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 应该逐渐升高。图7是取样剖面上浅层孔隙水和深层孔隙水的 Ca<sup>2+</sup> 和 Na<sup>+</sup> 含量变化图,基本反映了上述变化趋势。对于同位素,剖面上所取水样中放射性同位素含量由扇顶至扇缘逐渐降低,地下水年龄则逐渐变老。

5 结论

(1) 北京市永定河冲洪积扇地下水同位素取样剖面水平方向<sup>14</sup>C年龄由西北(冲洪积扇的上部)往东南(冲洪积扇的下部)逐渐增大。浅层孔隙水的<sup>14</sup>C年龄的变化范围为730~4900a,深层孔隙水为13420~22480a。

(2) 取样剖面垂直方向上<sup>14</sup>C年龄由浅部至深部逐渐增大。最大变化幅度为从3010a 增至22480a。

(3) 冲洪积扇的顶部到前缘地下水的径流速度逐渐变小。由地下水<sup>14</sup>C年龄求得的径流速度在冲洪积扇的上部为62. 63m/a,中部为14. 96m/a,下部为5. 02m/a。整个冲洪积扇平均为27. 54m/a,地下水径流条件较好。由<sup>14</sup>C年龄计算出的浅层地下水径流速度由山前至平原逐渐减小,反映地下水水平径流强度逐渐减弱,这一特点在相应的地下水水化学特征上也有所反映。

(4) 取样剖面垂直方向上自上而下地下水中氡含量逐渐减少。在冲洪积扇的中上部,浅部的松散孔隙水中的氡含量普遍高于深部的基岩裂隙水中的氡含量,但都在5~40TU 之间,都属于新近入渗水与“古水”形成的混合水。在冲洪积扇的中下部,地下水都属于松散孔隙水,但浅层孔隙水比深层孔隙水的氡含量高一到两个数量级,浅层水的氡含量在5~40TU 之间,是新近入渗水与“古水”形成的混合水,深层水的氡含量在0~5TU 之间,属“古水”。

(5) 氡的含量在水平方向逐渐降低,但是并不严格递减,而是在总体下降的情况下在趋势线上下波动。取样剖面上整个浅层孔隙水的氡含量都在15~35TU 之间,都属于40a 以内由大气降水形成的现代水。说明在整个冲洪积扇范围内大气降水与地下水之间的关系密切,水循环以垂直交替为主。地下水氡含量的总体降低是因为大气降水由山前至平原逐渐减少,氡含量的波动由局部的大气降水的强度变化造成的。

综上所述,地下水<sup>14</sup>C年龄在水平方向上由山前至平原逐渐增大;垂直方向上由浅部至深部逐渐增大;由<sup>14</sup>C年龄计算得到的浅层地下水径流速度由山

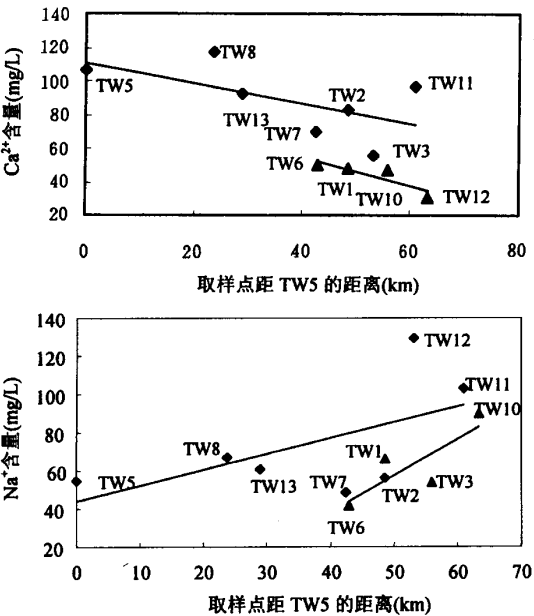


图7 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>含量变化图

Fig. 7 Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> contents

◆—浅层孔隙水; ▲—深层孔隙水

◆—Deep pore water; ▲—Shallow pore water

前至平原逐渐减小,反映地下水水平径流强度逐渐减弱。浅层孔隙水以垂向交替为主,深层孔隙水以水平径流为主,越靠近下游平原或含水层埋深越大,地下水交替越差,应慎重开采以达到地下水可持续利用目的。

### 参 考 文 献 / References

刘存富. 1984. 环境同位素水文地质基础. 武汉地质学院水文地质教

研室.

马致远. 2004. 环境同位素方法在平凉市岩溶地下水研究中的应用. 地质论评, 50(4): 433~439.

万军伟, 刘存富. 2003. 同位素水文学理论与实践. 武汉: 中国地质大学出版社.

Fonts J Ch. 1976. Isotopes du Milieu et cycles des eaux naturelles. quelques Aspects.

## A Preliminary Analysis of the $^{14}\text{C}$ Age of Groundwater in the Yongdinghe River Plain in Beijing

WANG Xinjuan<sup>1,2)</sup>, ZHOU Xun<sup>1)</sup>

1) School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing, 100083.

2) The Department of Geological Engineering Investigation of Beijing, Beijing, 100037

### Abstract

The isotopic technique is used in the study of the evolution of groundwater in the Yongdinghe River Plain in Beijing. The sampling profile, which has fourteen sampling locations, is along the flow direction of the groundwater in the Yongdinghe River pluvial and alluvial fan. The  $^{14}\text{C}$  and tritium contents of the groundwater are detected and the ages of the samples are calculated. The  $^{14}\text{C}$  age of the superficial porous aquifer ranges from 730a to 4900a, and that of the deep porous aquifer ranges between 13420a and 22480a. The  $^{14}\text{C}$  age gradually increases from the superficial to the deep aquifers in a vertical direction, and the largest range is from 3010a to 22480a. The contents of tritium of the superficial aquifer varies from 14.99 to 30.56Tu, and that of the deep aquifer ranges between 0.51 and 4.71Tu. By analyzing the changes in vertical and horizontal directions in the  $^{14}\text{C}$  age and the contents of tritium of the groundwater, we can examine the direction of the groundwater flow and calculate the velocity of the flow. The flow velocity ranges from 62.63m/a to 5.02m/a. The flow velocity of the superficial aquifer gradually decreases from the piedmont area to the plain, and subsurface runoff also decreases. The hydrologic circle of the superficial aquifer is mainly vertical, and that of the deep aquifer is mainly horizontal.

**Key words:** groundwater;  $^{14}\text{C}$  age; tritium; isotopes; Beijing

## 新 书 介 绍

赵汀、赵逊著. 自然遗产地保护和发展的理论与实践——以中国云台山世界地质公园为例. 北京: 地质出版社, 2005. 16开, 256页, 彩色图版12版. 本书系统总结了全球自然遗产保护活动, 包括国家公园、世界湿地、世界生物圈保护区(也称自然保护区)、世界自然文化遗产、世界地质公园, 这些活动的历史、发展现状及其在中国的开展情况, 总结了它们在地质遗迹保护中发挥的作用. 本书还着重对地质遗迹学科分类进行了探索, 就地质公园中地质遗迹保护和开发问题, 剖析了云台山世界地质公园, 展示了自然遗产地保护、开发和管理的一处范例. 本书可供从事地质遗迹、地质公园管理人员、科研人员及大专院校相关人员参考使用. 联系人:

100037, 北京阜外百万庄26号中国地质科学院赵汀.

赵逊、马寅生、吴中海等著. 云台山主要景观地质背景研究——云台山地貌成因. 北京: 地质出版社, 2005. 16开, 168页, 彩色图版8版, 内附多幅彩色插图. 本书主要从地质科学角度剖析了云台地貌成因, 对景区内地层系统、构造变形进行系统调查; 对太行山南缘新生代夷平面阶地进行分析, 阐明了其隆升过程、断裂活动、构造应力场特征; 建立了云台山景区三维地貌模型; 对主要地质地貌及地质遗迹的形成进行了专门分析. 本书可供从事地质研究的科研人员、地质公园的管理人员参考使用. 联系人: 100037, 北京阜外百万庄26号中国地质科学院赵汀.