



浑河流域沈阳-抚顺段地下水年龄及循环特征

石旭飞, 李 霄, 成 龙, 刘 强

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 利用 ^3H 法对浑河流域沈阳-抚顺段浅层地下水年龄进行了计算。通过对地下水年龄分区, 进而分析其循环特征, 为该地区地下水资源合理开发利用和城市资源环境承载力研究提供科学依据。结果表明: 总体上, 浑河流域沈阳-抚顺段地下水主要为近 60 a 以来补给的现代水, 并且从东部山区至西部平原地区沿着地下水流向年龄逐渐增大。年龄为小于 30 a、30~60 a、大于 60 a 的地下水分布面积占研究区总面积的比例分别为 34%、31%、35%。流域上游为丘陵山区, 含水层结构单一, 颗粒较粗, 地下水年龄小于 30 a, 地下水循环交替强烈。流域中游含水层逐渐增厚, 地下水循环交替强度逐渐减弱, 地下水年龄增大为 30~60 a。流域下游含水层逐渐由单层转变为双层和多层, 颗粒较细, 地下水循环交替缓慢, 地下水年龄也增大为大于 60 a。

关键词: 氚; 地下水年龄; 地下水循环; 含水层; 浑河流域

AGE AND CIRCULATION CHARACTERISTICS OF THE GROUNDWATER IN SHENYANG-FUSHUN SECTION OF HUNHE RIVER BASIN

SHI Xu-fei, LI Xiao, CHENG Long, LIU Qiang

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The age of shallow groundwater in Shenyang-Fushun section of Hunhe River Basin is calculated with ^3H isotopic method. Through the age zoning of groundwater and analysis of its circulation characteristics, the paper provides a scientific basis for the rational development and utilization of groundwater resources and study on carrying capacity of urban resources and environment. The results show that the groundwater in the Shenyang-Fushun section is mainly the modern water replenished in the past 60 years, and the age of groundwater flow increases gradually from the eastern mountainous area to the western plain. The distribution area of groundwater aged less than 30 a, 30–60 a and more than 60 a account for 34%, 31% and 35% of the total of the study area, respectively. The upper reaches of the basin are hilly and mountainous area, with single aquifer structure, coarse particles, groundwater age less than 30 a and strong groundwater circulation. The aquifer in the middle reaches thickens gradually, the alternation of groundwater circulation weakens gradually, and the groundwater age increases to 30–60 a. The aquifer in the lower reaches gradually changes from single layer to double layer and multilayer, with fine particles and slow water circulation, and the groundwater age increases to more than 60 a.

Key words: tritium; groundwater age; groundwater circulation; aquifer; Hunhe River Basin

收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-04-14. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽流域水文地质与水资源调查监测”(DD20221753).

作者简介: 石旭飞(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质与环境地质调查与研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail/shixufei1986@163.com

0 引言

浑河流域沈阳-抚顺段是东北老工业基地的核心地区,人口密度大,工业发达,城市化水平较高^[1]. 地下水是浑河流域工农业生产和生活用水的重要供水来源^[2]. 但是,由于地铁修建^[3]、地下空间开发利用、采矿疏干排水^[4]等原因,研究区地下水系统循环演化条件发生了显著变化. 同时由于地下水资源分布不均和对地下水循环规律认识不足等原因,不合理地下水开发,已经导致了矿坑涌水^[4]、水质恶化^[5-7]等一系列环境地质问题. 因此,浑河流域地下水循环规律亟待研究.

同位素技术是分析地下水循环规律的重要手段^[8-12]. 氢同位素作为水分子的组成部分参与地下水的循环演化,是定量分析地下水循环规律的理想示踪剂^[13-17]. 本研究选择富水性较强的浅层第四系孔隙水含水层中的地下水为目标,利用氚(³H)同位素测年技术对浑河流域沈阳-抚顺段浅层地下水年龄进行计算,并对其地下水循环规律进行分析,旨在为该地区地下水资源合理开发利用和城市资源环境承载力研究提供科学依据.

1 研究区地质与水文地质条件

浑河流域沈阳-抚顺段位于辽宁省中部,东部为山地、丘陵地貌,西部为广阔的平原,面积约 6 049.2 km²,浑河由东北向西南穿过汇入辽河(图 1). 流域内前第四纪地层主要出露于东部的山地、丘陵地区,岩性以鞍山群花岗岩麻岩和各种变质岩为主,并且分布有以浑河断裂为主干的东西向、北东向断裂带,对区内地下水的赋存和运移有一定的影响.

浑河流域沈阳-抚顺段第四纪地层大面积分布于西部平原地区,从下更新统至全新统均有出露,主要由冲积层、冲洪积层、洪积层、坡洪积层及冰水堆积层组成. 由东向西沉积颗粒从圆砾、砾砂、卵石夹薄层砂,逐渐相变为细砂、中砂、粗砂夹黏性土透镜体、黏土和亚黏土,层位由单层、双层增加至多层,地层厚度逐渐增大. 其中赋存于第四系松散岩类含水层中的地下水为本次的研究对象.

浑河流域沈阳-抚顺段地下水主要接受大气降水入渗补给,在东部山区还存在少量基岩裂隙水的侧向径流补给. 总体上,研究区地下水由东部山地、丘陵地

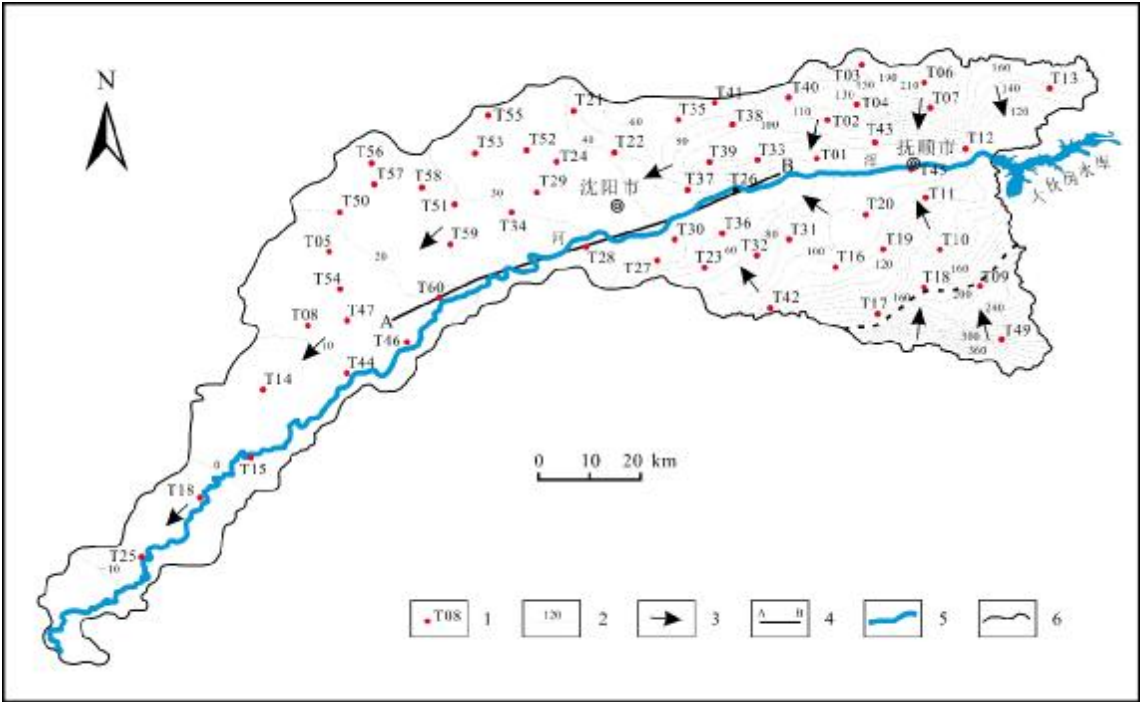


图 1 研究区浅层地下水等水位线图及采样点分布

Fig. 1 Water level contour map of shallow groundwater with distribution of sampling points in the study area

1—采样点及编号(sampling point and number); 2—等水位线(contour of water table); 3—地下水流向(direction of groundwater flow); 4—水文地质剖面(hydrogeologic profile); 5—地表水(surface water); 6—研究区边界(boundary of the study area)

区向西部平原区径流,在东部山区,地下水由南北两侧山区向中部浑河河谷径流,水力坡度由山前向平原逐渐减小.研究区地下水的排泄方式以人工开采为主,其次为潜水蒸发和向浑河径流排泄(图 1).

2 样品采集与测试

本研究于 2018 年 7—9 月在浑河流域沈阳-抚顺段采集了 60 组地下水氡样品.样品布设原则为:在地下水水力梯度较大的地区采样点分布较密,在水力梯度较小的地区采样点较疏.样品主要采集于民井,采样深度均为 5~20 m,采样层位为浅层第四系孔隙水含水层,岩性主要为细砂、中砂.采样时先将井管中存留的水抽出,取含水层新进入井管中的水作为样品,样品容器为 500 mL 聚乙烯瓶.采样时先将取样瓶用蒸馏水清洗,再用井水将取样瓶润洗 3 次后将取样瓶灌满封口,同时记录采样点地理位置等信息.采样点分布如图 1 所示.样品由中国地质科学院水文地质环境地质研究所利用超低本底液体闪烁谱仪测试完成.测试结果见表 1.

表 1 样品测试结果
Table 1 Test results of water samples

样品号	³ H/TU	样品号	³ H/TU	样品号	³ H/TU	样品号	³ H/TU
T01	11.6	T16	10.9	T31	11.0	T46	1.0
T02	10.1	T17	12.6	T32	9.8	T47	5.0
T03	10.5	T18	2.1	T33	15.7	T48	8.8
T04	10.8	T19	12.6	T34	5.5	T49	8.0
T05	2.8	T20	11.6	T35	10.7	T50	6.6
T06	9.4	T21	2.9	T36	7.5	T51	7.2
T07	10.6	T22	9.0	T37	9.7	T52	4.7
T08	4.2	T23	1.0	T38	1.0	T53	6.9
T09	11.0	T24	7.4	T39	10.8	T54	6.6
T10	11.5	T25	1.0	T40	10.9	T55	2.7
T11	10.1	T26	10	T41	12.3	T56	1.7
T12	11.0	T27	8.1	T42	10.3	T57	5.2
T13	10.4	T28	8.7	T43	8.6	T58	7.7
T14	3.9	T29	9.0	T44	3.6	T59	1.6
T15	4.8	T30	9.6	T45	9.9	T60	1.8

3 地下水 ³H 年龄的计算

3.1 计算方法

本研究将地下水系统中氡的传输关系概化为线性规则,并将地下水系统概化为线性的集中参数系统.在稳定流条件下,地下水中氡的输入和输出关系可用下列卷积公式描述^[17].

$$C_{out}(t)=\int_0^{\infty} C_{in}(t-\tau)e^{-\lambda\tau}\cdot g(\tau)d\tau$$
 (1)

式中: t 为地下水 ³H 样品的采集时间; $C_{out}(t)$ 为 t 时刻地下水样品中 ³H 的浓度,即地下水氡的输出浓度; τ 为 ³H 的在含水层中滞留的时间,即地下水的年龄; $C_{in}(t-\tau)$ 为 $t-\tau$ 时刻地下水补给来源的 ³H 浓度,即 $t-\tau$ 时刻大气降水的 ³H 浓度; $e^{-\lambda\tau}$ 为同位素衰变因子, λ 为 ³H 衰变常数; $g(\tau)$ 为含水层中地下水年龄的分配函数,即地下水样品中不同年龄地下水所占的比例.

研究区地下水含水层介质主要为砂砾石、中砂、亚砂土等.大气降水入渗补给地下水后可以概化为活塞流运动,即流线相互平行.不同年龄的地下水不发生水流混合,则大气降水中的氡进入含水层后仅按衰变规律变化.因此式(1)可转化为:

$$C_{out}(t)=C_{in}(t-\tau)e^{-\lambda\tau}$$
 (2)

由此可以看出,同位素数学物理模型法计算地下水 ³H 年龄 τ 所需要的主要参数为地下水系统的 ³H 输入函数,即 $t-\tau$ 时刻的大气降水 ³H 浓度.

3.2 研究区历史大气降水 ³H 浓度的确定

1953 年之前,全球大气降水 ³H 浓度的背景值约为 10 TU,受核爆试验的影响,1953 年之后的大气降水 ³H 浓度显著增加.由于研究区缺乏长期的大气降水 ³H 浓度监测资料,所以根据国际原子能机构在全球设置的大气降水 ³H 浓度监测站分布及其监测时间情况,选择监测数据较全且距离研究区较近的监测站,通过以下步骤计算研究区 1953—2018 年大气降水 ³H 浓度系列.

1)利用 1970—1978 年的中国香港站、日本东京站和俄罗斯的伊尔库茨克站、哈巴罗夫斯克站之间的空间相对位置和大气降水 ³H 浓度系列资料,通过建立多元函数的趋势面方程(3)^[18-19]计算得到研究区 1970—1978 年大气降水 ³H 浓度系列.

$$T_i(x,y)=A_i x+B_i y+C_i$$
 (3)

式中: x 和 y 为各监测站的经度和纬度; $T_i(x,y)$ 为在

(x,y)处第 i 年的大气降水 ^3H 浓度; A_i 、 B_i 、 C_i 为第 i 年大气降水 ^3H 浓度与监测站经纬度相关方程的系数.

2) 利用 1979—1983 年的中国香港站和俄罗斯的伊尔库茨克站、哈巴罗夫斯克站、斯科沃罗季诺站、霍尔姆斯克站、绫里站之间的空间相对位置和大气降水 ^3H 浓度系列资料, 通过建立多元函数的趋势面方程 (3) 计算得到研究区 1979—1983 年的大气降水 ^3H 浓度系列.

上述监测站监测数据来源于国际原子能机构官方网站 (http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html).

通过相关系数显著性检验, 所求出的历年各相关方程均具有较好的代表性(表 2).

表 2 研究区大气降水 ^3H 浓度趋势面方程系数表
Table 2 Trend surface equation coefficients of ^3H concentration of precipitation in the study area

年份	A	B	C	相关系数
1970	-7.29	9.80	676.67	0.93
1971	-6.32	14.07	436.02	0.99
1972	-3.00	6.43	225.98	0.99
1973	0.03	6.90	-167.28	0.89
1974	-2.65	5.78	190.60	0.99
1975	-2.05	5.50	120.49	0.99
1976	-1.54	4.40	84.11	0.99
1977	-1.52	4.26	88.33	0.99
1978	0.21	4.06	-116.81	0.89
1979	-0.88	3.31	28.08	0.94
1980	-2.16	4.25	156.41	0.98
1981	-1.92	4.28	130.09	0.97
1982	-0.95	1.92	72.79	0.97
1983	-2.04	2.46	201.91	0.98

3) 由于世界各地与监测系列资料最齐全的加拿大渥太华站大气降水 ^3H 浓度相关系数一般都大于 0.9^[20], 因此利用计算得出的研究区 1970—1983 年大气降水 ^3H 浓度系列数据和渥太华站 1970—1983 年大气降水 ^3H 浓度系列数据建立相关方程(相关系数 0.97), 并利用该相关方程和渥太华站大气降水 ^3H 浓度监测数据

(1953—2018 年), 计算得到研究区 1953—1969 年和 1984—2018 年大气降水 ^3H 浓度系列数据. 结果见图 2.

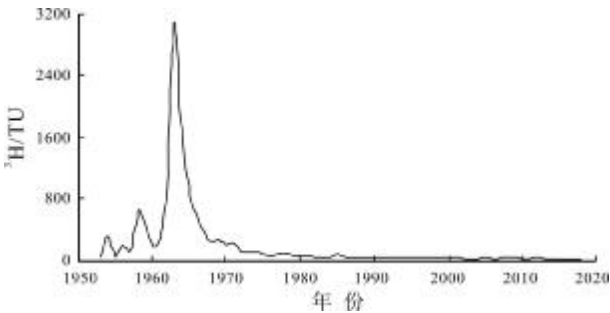


图 2 研究区 1953—2018 年大气降水 ^3H 浓度
Fig. 2 ^3H concentration curve of precipitation during 1953—2018 in the study area

3.3 研究区地下水年龄计算结果

将研究区 1953—2018 年大气降水 ^3H 浓度系列代入式(3), 计算得到研究区 1953—2018 年地下水 ^3H 输出浓度系列. 1953 年之前的含氚降水入渗进入地下水之后, 根据放射性同位素衰变原理, 到 2018 年时, 地下水的 ^3H 浓度衰减为 0.3 TU, 已小于 ^3H 测试本底值 (2.5 TU). 因此若地下水样品的 ^3H 浓度小于 ^3H 的测试本底值, 一般可认为其年龄大于 65 a; 若地下水样品的 ^3H 浓度大于 ^3H 测试本底值, 则表明地下水为 1953 年后接受大气降水补给的. 因此, 对于氚测试结果大于 2.5 TU 的地下水样品, 将其氚测试结果与研究区 1953—2018 年地下水 ^3H 输出浓度系列进行对比, 得出其地下水 ^3H 年龄(表 3).

4 研究区地下水年龄空间分布和水循环特征

4.1 地下水年龄空间分布特征

根据地下水 ^3H 年龄计算结果做出研究区地下水年龄分区图(图 3).

由图 3 可以看出, 总体上, 浑河流域沈阳—抚顺段地下水主要为近 60 a 以来补给的现代水, 并且从东部山区至西部平原地区沿着地下水流向年龄逐渐增大.

年龄小于 30 a 的地下水主要分布在研究区东部抚顺地区的哈达镇、章党镇、会元乡、望滨乡、高坎镇、英达镇、碾盘乡、救兵乡、千金乡、塔峪镇、石文镇、深井子镇等地. 上述地区位于浑河流域上游, 属于流域地下水补给区, 主要为山地、丘陵地区, 被浑河支流切割形成相间分布的谷地, 地势落差较大, 所以地下水水力梯

表 3 地下水样品 ³H 年龄计算结果
Table 3 ³H age calculation results of groundwater samples

样品号	年龄/a	样品号	年龄/a	样品号	年龄/a	样品号	年龄/a
T01	12	T16	17	T31	17	T46	65
T02	16	T17	33	T32	44	T47	61
T03	28	T18	63	T33	7	T48	31
T04	17	T19	33	T34	42	T49	20
T05	63	T20	12	T35	15	T50	62
T06	19	T21	42	T36	38	T51	34
T07	28	T22	30	T37	44	T52	42
T08	61	T23	42	T38	42	T53	42
T09	17	T24	26	T39	17	T54	62
T10	14	T25	65	T40	17	T55	42
T11	16	T26	20	T41	18	T56	63
T12	17	T27	24	T42	29	T57	61
T13	29	T28	31	T43	37	T58	38
T14	61	T29	30	T44	61	T59	63
T15	61	T30	44	T45	20	T60	63

度较大(1/300~1/500)。同时上述地区浅层第四系松散岩类孔隙水还接受基岩裂隙水的补给,基岩裂隙水接受大气降水入渗后迅速补给浅层第四系松散岩类孔隙水,地下径流短,流速快。综上,上述地区地下水循环交替速度比较快,地下水年龄小,年龄小于 30 a 的地下水分布面积约占研究区总面积的 34%。

年龄为 30~60 a 的地下水主要分布于研究区中部沈阳地区的道义镇、马三家子镇、造化镇、沙岭镇、法哈牛镇、于洪区、大东区、长白乡、白塔镇、古城子镇、李相镇等地。上述地区位于浑河流域中游,属于流域地下水径流区,从东向西由丘陵逐渐转变为平原,地势逐渐变缓,与东部山区相比,地下水水力梯度变小(1/500~1/1000),水循环交替速度变慢,地下水年龄增大。年龄为 30~60 a 的地下水分布面积约占研究区总面积的 31%。

年龄大于 60 a 的地下水主要分布在浑河下游的高花镇、杨士岗镇、长滩镇、潘家堡镇、茨榆坨镇、于家房镇、朱家房镇、高力房镇、韭菜台镇等地。上述地区位于浑河流域下游,属于流域地下水排泄区,主要为冲积平原区,地势平缓,所以地下水水力梯度小(1/1000~1/2000),水循环交替速度慢,地下水年龄也较大。年龄

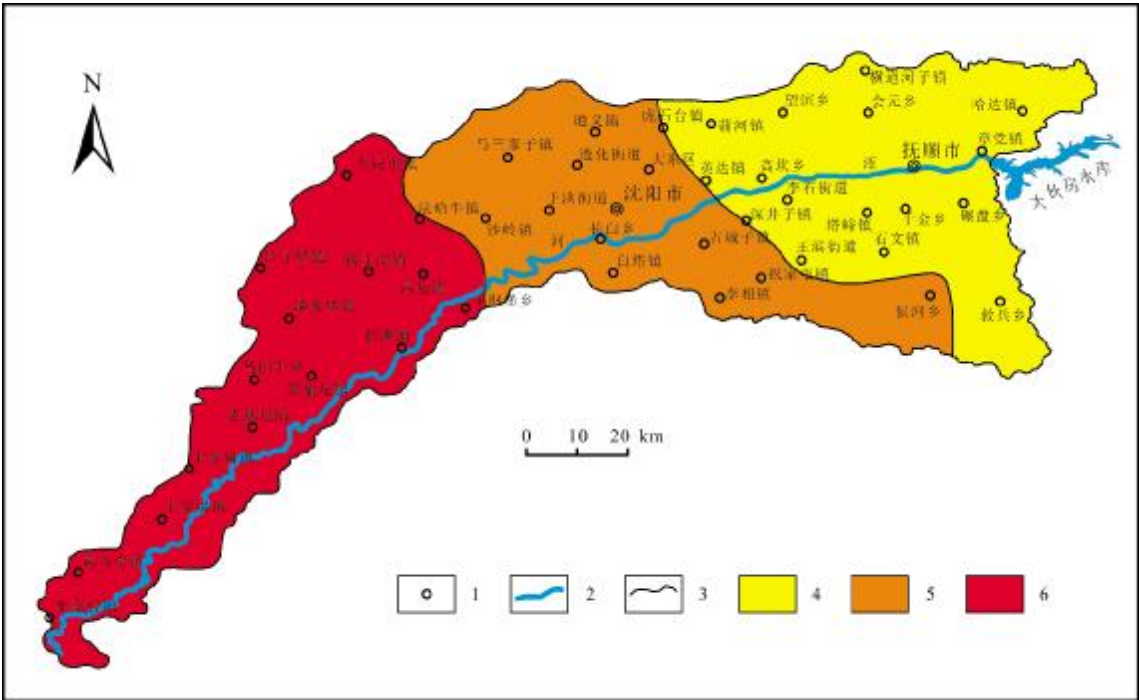


图 3 研究区地下水年龄分区图
Fig. 3 Zoning map of groundwater age in the study area
1—乡镇(town); 2—地表水(surface water); 3—研究区边界(boundary of the study area); 4—<30 a; 5—30-60 a; 6—>60 a

大于 60 a 的地下水分布面积约占研究区总面积的 35%。

4.2 地下水年龄反映的循环特征

浑河流域沈阳-抚顺段地下水的补给来源主要为大气降水, 年龄小于 30 a 的地下水所处含水层结构单一, 含水层岩性主要为砾砂, 颗粒较粗, 所以地下水循环交替较快。东部基岩山区发育多个浑河支流河谷, 大气降水渗入地下后以基岩裂隙水侧向径流和河谷地下潜流的方式补给浑河。浑河北岸地下水流向为东北流向西南, 浑河南岸地下水流向为东南流向西北。水力梯度大, 地下水循环交替强烈。

研究区中部地区从东向西由丘陵逐渐转变为平原, 地下水流向主要由东向西流动至浑河流域中游地区, 地下水年龄逐渐增大为 30~60 a。因为研究区中部地区第四系松散岩类孔隙水含水层逐渐增厚, 含水层颗粒由砾砂逐渐变为粗砂、中砂(图 4), 地形坡度变小, 水力坡度减小, 地下水循环交替强度也逐渐减弱。在研究区西部地下水年龄大于 60 a 的地区, 第四系松散岩类孔隙水含水层逐渐由单层转变为双层和多层, 含水层颗粒以细砂、粉砂为主, 并且黏性土层增多(图 4), 导致地下水循环交替缓慢, 地下水滞留时间长, 地下水年龄也大。

5 结论

1) 浑河流域沈阳-抚顺段地下水主要为近 60 a 以来补给的现代水, 从东部山区至西部平原地区沿着地

下水流向年龄逐渐增大。

2) 年龄大于 60 a 的地下水分布面积最大, 约占研究区总面积的 35%; 其次是年龄小于 30 a 的地下水, 其分布面积约占研究区总面积的 34%; 年龄为 30~60 a 的地下水分布面积最小, 约占研究区总面积的 31%。

3) 流域上游为丘陵山区, 地形坡度较大, 地下水水力梯度也较大, 地下水年龄小于 30 a, 地下水循环交替强烈; 流域中游地下水循环交替强度逐渐减弱, 地下水年龄增大为 30~60 a; 流域下游属于冲积平原区, 地势平坦, 地下水水力梯度小, 地下水循环交替缓慢, 地下水滞留时间长, 地下水年龄也增大为大于 60 a。

4) 年龄小于 30 a 的地下水所处含水层结构单一, 岩性主要为砾砂, 颗粒较粗, 所以地下水循环交替较快。年龄为 30~60 a 的地下水所处含水层逐渐增厚, 含水层颗粒同砾砂逐渐变为粗砂、中砂, 地下水循环交替强度逐渐减弱。年龄大于 60 a 的地下水所处含水层逐渐由单层转变为双层和多层, 含水层颗粒以细砂、粉砂为主, 颗粒变细, 并且黏性土层增多, 导致地下水循环交替缓慢, 地下水滞留时间长。

参考文献(References):

- [1] 刘洋. 浑河流域水资源承载能力研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2010.
Liu Y. Study on water resources carrying capacity of Hunhe River Basin[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010.
- [2] 唐雯. 沈阳经济区地下水动态变化规律及污染防治对策研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

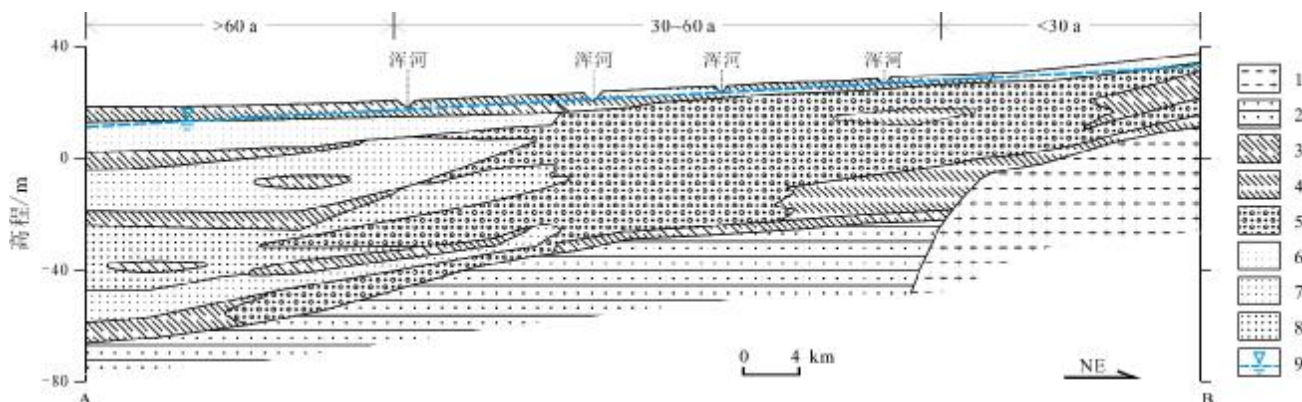


图 4 研究区水文地质剖面地下水年龄分区图

Fig. 4 Hydrogeological profile of groundwater age zoning in the study area

1—花岗岩(granite); 2—砂岩(sandstone); 3—粉质黏土(silty clay); 4—粉土(silt); 5—砾砂(gravel sand); 6—细砂(fine sand); 7—中砂(medium sand); 8—粗砂(coarse sand); 9—地下水位(groundwater level)

- Tang W. The research for countermeasures on dynamic change laws and the pollution prevention and control of groundwater in Shenyang Economic Zone[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [3]王峰. 沈阳地铁疏干水利用方案研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- Wang F. Project study on the utilization of engineering dewatering in subways of Shenyang[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.
- [4]佟鸿儒, 肖平. 抚顺西露天矿矿坑涌水的综合循环利用[J]. 露天采矿技术, 2010, 25(6): 45, 47.
- Tong H R, Xiao P. Comprehensive recycling use of pit water in Fushun western surface mine[J]. Opencast Mining Technology, 2010, 25(6): 45, 47.
- [5]袁雅姝, 方珍, 傅金祥. 浑河流域沈抚段枯水期氮污染特征研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 726-736.
- Yuan Y S, Fang Z, Fu J X. Characteristics of nitrogen pollution in Shen Fu section of Hunhe River Basin during dry season[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(4): 726-736.
- [6]石旭飞, 代雅建, 崔健, 等. 沈阳市城市地质环境问题研究[J]. 地质与资源, 2017, 26(4): 390-396.
- Shi X F, Dai Y J, Cui J, et al. Study on the geological environment of Shenyang City[J]. Geology and Resources, 2017, 26(4): 390-396.
- [7]崔健, 李霄, 都基众, 等. 基于 GIS 的浑河冲洪积扇地浅层地下水防污性能评价[J]. 地质与资源, 2011, 20(2): 137-140.
- Cui J, Li X, Du J Z, et al. The GIS-based assessment of antipollution capacity of shallow groundwater in the alluvial fan of Hunhe River[J]. Geology and Resources, 2011, 20(2): 137-140.
- [8]张亚丽. 基于稳定同位素与水化学的浑太河流域水循环特征与水体氮污染研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- Zhang Y L. Study on the characteristics of water cycle and nitrogen pollution in Hun River and Taizi River basin by using stable isotope and hydrochemical data[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [9]Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997: 20-23.
- [10]Gibson J J, Edwards T W D, Birks S J, et al. Progress in isotope tracer hydrology in Canada[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(1): 303-327.
- [11]王文祥, 安永会, 李文鹏, 等. 基于环境同位素技术的张掖盆地地下水流动系统分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 25-30.
- Wang W X, An Y H, Li W P, et al. Groundwater flow system analysis of the Zhangye Basin based on environmental isotope techniques[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 25-30.
- [12]蒋芳婷, 孟玉川, 宋泓苇, 等. 淮河下游地区地表水与地下水同位素特征分析[J]. 水文, 2022, 42(1): 90-96.
- Jiang F T, Meng Y C, Song H W, et al. Analysis of isotopic characteristics of surface water and groundwater in the lower reaches of Huaihe River[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1): 90-96.
- [13]石旭飞, 赵海卿, 郭晓东. 基于同位素技术的珲春盆地浅层地下水可更新能力研究[J]. 水文, 2017, 37(4): 40-44.
- Shi X F, Zhao H Q, Guo X D. Study on renewability of shallow groundwater in Hunchun Basin based on isotope technology [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(4): 40-44.
- [14]石旭飞, 董维红, 李满洲, 等. 河南平原浅层地下水年龄[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 190-197.
- Shi X F, Dong W H, Li M Z, et al. The age of shallow groundwater in Henan Plain[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1): 190-197.
- [15]苗晋祥. 基于同位素的豫北平原浅层地下水形成的认识[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 5-11.
- Miao J X. Formation of the shallow groundwater in the northern Henan Plain based on isotope analyses [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 5-11.
- [16]Shi X F, Dong W H, Li M Z, et al. Evaluation of groundwater renewability in the Henan Plains, China[J]. Geochemical Journal, 2012, 46(2): 107-115.
- [17]高淑琴. 河南平原第四系地下水循环模式及其可更新能力评价[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- Gao S Q. Groundwater cycle pattern and renewability evaluation of groundwater in the Quaternary aquifer in Henan Plain[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [18]Shaw B R. Evaluation of distortion of residuals in trend surface analysis by clustered data[J]. Mathematical Geology, 1977, 9(5): 507-517.
- [19]Sun L, Zhou X K, Lu J T, et al. Climatology, trend analysis and prediction of sandstorms and their associated dustfall in China[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2003, 3(2): 41-50.
- [20]王福刚. 同位素技术在黄河下游悬河段(河南段)水循环特征研究中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- Wang F G. The application of isotope techniques in the hydrological cycle of overground section (Henan section) of the lower reaches of Yellow River[D]. Changchun: Jilin University, 2006.