北京市通州区地热流体水化学和同位素特征及其地热学意义

袁利娟,张进平,何云成,孔祥军,高剑
北京市地热研究院, 自然资源部浅层地热能重点实验室,北京,100012

www.geojournals.cn/georev

内容提要: 通过对北京市通州区蓟县系岩溶热储中地热流体的水化学组分、^{2}H、^{18}O、^{3}H、^{14}C、锶同位素组成的研究,论述了区域内地热系统中水的补给径流循环特征和地温分布特征。研究区内蓟县系热储中地热水的出水温度分布在35~91 ℃范围内,补给来源为北京市西北部或北部山区大气降水,平均补给高程为1510 m。热储中地热水年龄和热储温度均呈现出明显的构造控制特点。通州区西部,大兴迭隆起构造单元内,热水年龄从西北(18 ka)向东南(27 ka)增加,运移速度约1.5 m/a,热储温度从57.4 ℃增至86.5 ℃。东南部的夏垫断裂是一个导水导热断裂,其上地热水年龄减小至8.4 ka,同时热储温度增至107.8 ℃。地热水中锶含量和锶同位素值均沿着地下水的径流方向增加,揭示了两个过程的叠加影响:蓟县系碳酸盐岩中锶的溶解与^{87}Rb的衰减,后者呈现出明显的时间累积效应,在研究区东南部体现的更明显。

关键词:北京市通州区;地热水;水化学;锶同位素;热储温度

首都城市建设对地热资源的需求较大,北京作为全球6个有地热资源的首都之一,地热资源开发规模较大。截止2019年底,北京市有地热井533眼,成井深度大多数分布在2000~4000 m之间。这让我们对地面以下2000~4000 m深度范围内的地热系统的研究成为可能,对北京市平原区蓟县系热储层中地热流体的水化学、水稳定同位素特征也有了一定程度的了解(于湲, 2006; 刘凯等, 2017; 袁利娟等, 2020),但其指示的地热流体的补给、循环特征却较少涉及。前人研究表明锶同位素对水岩作用反应灵敏,可作为示踪地下水循环的有效手段(马致远和范基姣, 2005)。水体流经地质体时会带出其中的锶,而锶的地球化学性质非常稳定,在水文地球化学作用过程中不会发生分馏,不同的岩石组分具有其特定的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值,从而造成不同水体可能具有不同的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值,且与不同的地质环境相对应(叶萍等, 2008)。北京地区尚未开展过地热流体中锶元素及锶同位素的示踪研究,对其在地热系统中的应用效果也不掌握。

通州作为北京城市副中心,"十四五"期间北京最大的建设工程,区域建设对清洁能源需求巨大。2015年通州东部中温地热资源的勘探突破更是极大的推动了通州区地热资源的开发进程(邹登亮等,2015)。对地热水的补给、循环,以及热储温度分布等特征的掌握,是科学合理开发地热资源的基础。本文利用水化学和^{2}H、^{18}O、^{3}H、^{14}C、$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$等同位素手段,系统描述了通州区地热流体的水化学同位素特征,着重分析了中元古界蓟县系热储中地热流体的补给来源、循环途径、热储温度等特点,希望为城市地热资源的开发保护提供科学支撑。

1 通州区概况

通州区位于北京平原区的东南部,总面积906 km^2。区内地势平坦,总体由西北向东南倾斜,全区平均海拔20 m,坡降0.3%~0.6%。年平均温度11.3℃,降水量为620 mm左右。

区内断裂发育,北东向的南苑—通县断裂、夏垫断裂将研究区划分为三个Ⅲ级构造单元:北京迭断陷($Ⅲ_6$)、大兴迭隆起($Ⅲ_7$)和大厂新断陷($Ⅲ_8$)(图1)。大兴迭隆起面积最大,北东—南西向断裂和北西—南东向两组断裂在该构造单元内交汇,形成导水导热通道。区内地层自老到新发育有太古宇,元古宇长城系、蓟县系和白口系,古生界寒武系、奥陶

注: 本文为北京市通州区地热资源优化开采模式研究项目(编号:PXM2019_158309_000005)的成果。
收稿日期:2021-04-12;改回日期:2021-06-28;网络首发:2021-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.07.045
作者简介:袁利娟,女,1985年生,博士,高级工程师,主要从事地热地质研究; Email: yuanlijuan2010@163.com。

系、石炭系、二叠系,新生界古近系、新近系和第四系(北京市地质矿产局,1982)。

蓟县系雾迷山组白云岩是通州区内主要热储层,以粉晶白云岩为主,燧石条带较为发育。主要矿物为白云石,含量约为 72.8%~98.9%,其次为石英和长石,含量为 1%~20%(孔祥军, 2019)。蓟县系雾迷山组热储层在全区内均有分布,地层的完整厚度约 2230 m(北京市地质矿产局, 1982)。已有钻孔数据显示东部北京迭断陷(III_6)内热储层的埋藏深度为 500~800 m;中部大兴迭隆起(III_7)内热储层的埋藏深度最浅为 474 m,最大约 2500 m;而东南部大厂新断陷(III_8)内热储层的最小埋藏深度约 2500 m,最大可达 5000 m 以上。通州区内地热资源开发利用规模较大,截止目前,已完成 29 眼地热井,大部分位于在大兴迭隆起内(图 1)。区内目前地热井最大钻探深度为 3588.88 m,出水温度最高为 91 ℃,该井位于夏垫断裂上。北京市目前发现的出水温度高于 90 ℃ 的地热井均位于夏垫断裂沿线及其延线上(张进平和袁利娟, 2015)。

2 数据来源

2015 年到 2019 年间采集的区内蓟县系雾迷山组含水层中地热水 23 件(表 1)。为了掌握地热流体的循环特征,还采集了大气降水 6 件、地表水 8 件和第四系地下水 36 件,共计 73 件水样(图 1)。主要测试项目包括水化学、^{3}H、δD、$\delta^{18}O$、^{14}C 和 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$。热矿水全分析测试在北京市水文地质工程地质大队完成,为保证样品的代表性,测试样品均利用经规定程序清洗过的干燥的容积为 10 L 的聚乙烯瓶采集,然后用螺纹盖密封,24 h 内交达实验室完成分析测试,阴阳离子平衡检查的相对误差<±5%。其他水样的主微量元素测试分析,以及全部水样的氚含量和 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。^{3}H 用 Quantulus 1220-003 低本底液闪仪完成测试,检出限为 1.3 TU。$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 使用 Phoenix 热表面电离质谱仪完成测试,本批次 23 件样品的绝对偏差分布在 0.000010~0.000025 范围内。δD、$\delta^{18}O$、$\delta^{14}C$ 和 $\delta^{13}C$ 委托 BETA 实验室完成,分别利用同位素比质谱仪和加速器质谱完成,绝对偏差分别为±0.3‰、±1‰、±0.2 pMC 和±0.3‰。

3 结果和讨论

3.1 水化学、同位素特征和补给来源

研究区内不同水体中的阴离子均以 HCO_3^- 为主,阳离子组成差异较大(图 3)。区内地热水出水温度分布在 35~91 ℃ 范围内,pH 分布在 7.2~9.6

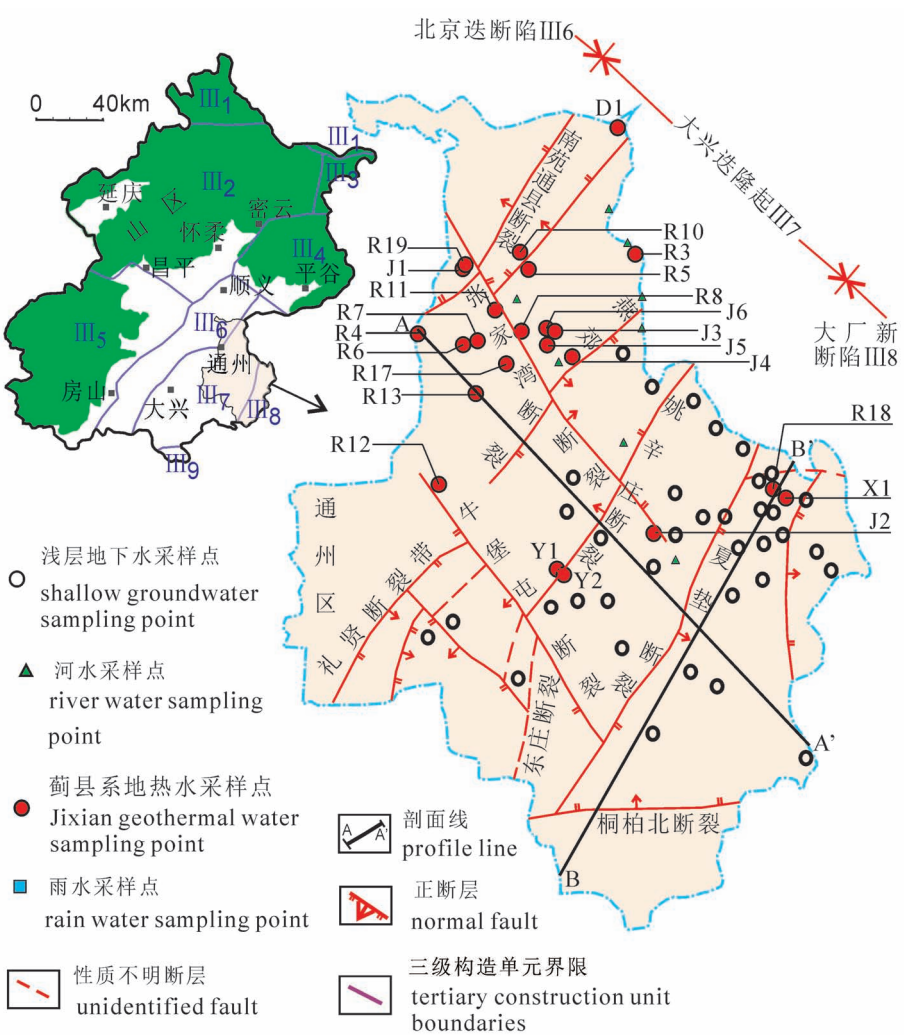


图 1 北京市通州区地热流体水化学和同位素研究采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of the sampling sites for hydrochemical and isotopic characteristic study of geothermal fluids in Tongzhou District, Beijing

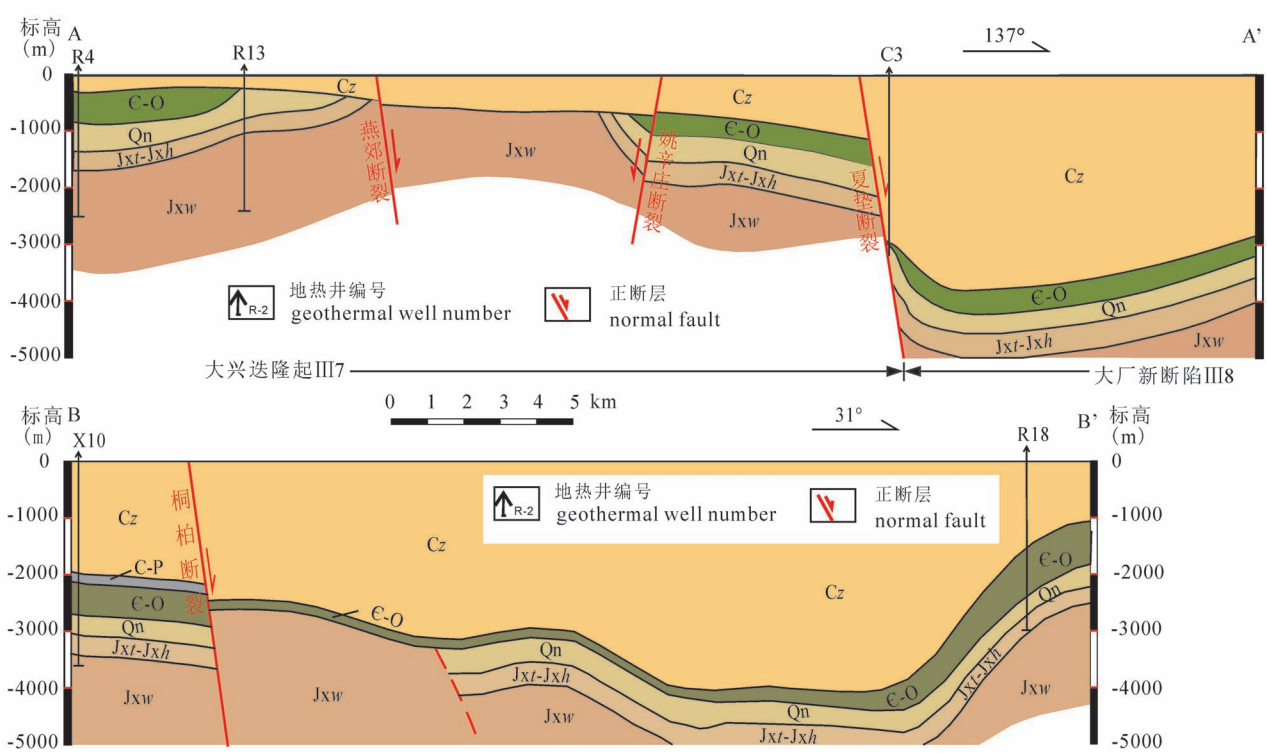


图 2 北京市通州区地质剖面图

Fig. 2 Geological profiles in Tongzhou District, Beijing

范围内,TDS 分布在 309~1409 mg/L 范围内,均值为 536 mg/L,地热水水化学类型属 HCO_3^-—Na^+型。第四系地下水 TDS 分布在 310~447 mg/L 范围内,均值为 364 mg/L,按照舒卡列夫分类,水化学类型包括 HCO_3^-—Na^+型和 HCO_3^-—Ca^{2+} · Na^+型。雨水的 TDS 分布在 19~73 mg/L 范围内,部分雨水样品中 SO_4^{2-}含量较高,可能是煤炭燃烧产生的 SO_2 的贡献(Aas et al., 2007; Xu Zhifang and Han Guilin, 2009)。河水的 TDS 分布在 351~646 mg/L 范围内,Cl^-存在一定程度的富集,表现了蒸发浓缩的水化学过程。

研究区不同水体的 $\delta^{18}O$、δD 组成示于图 4。通州区第四系地下水和蓟县系地热水均点落在当地大气降水线(Li Jie et al., 2018)右侧,几乎与之平行。相同的现象在北京土壤水(Deng Wenping et al., 2013)以及延庆盆地地下水(Li Jie et al., 2018)中也出现过。造成这种现象的原因降雨进入土壤,与土壤中受蒸发作用影响的地下水混合,使得地下水同位素组成偏离当地大气降水线(Allison et al., 1984)。

第四系地下水 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 散布在 -11.7‰~-6.4‰范围内。与第四系地下水的同位素组成相比,地热水的 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 组成比较集中,分布范围为 -11.4‰~-9.1‰,均值为-10.5‰。结合水化学组成特征(图 4),出现了一个有意思的现象:第四系地下水富集 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$(>-9.0‰)时,其 Ca^{2+}的毫摩尔分数(该离子毫摩尔浓度占阴或阳离子毫摩尔浓度总数的百分比)较高(均值约 30%),Na^+浓度低(均值约 47%),地下水化学类型为 HCO_3^-—Ca^{2+} · Na^+型。而当第四系地下水同位素组成($\delta^{18}O_{V-SMOW}$ < -9.0‰)与地热水相近时,第四系地下水中 Ca^{2+}浓度均值下降至 17%,而 Na^+浓度均值增至近 72%,地下水化学类型为 HCO_3^-—Na^+型。这个变化和华北平原地区淡水的化学演化吻合:伴随着循环路径、循环时间的加长和溶滤作用的加强,水化学类型从 HCO_3^-—Ca^{2+}向 HCO_3^-—Ca^{2+} · Na^+,再向 HCO_3^-—Na^+转变(郭永海等,2002)。Ⅰ组来源于当地大气降水的垂直入渗补给,氧同位素更接近于当地大气降水均值,循环路径短,溶滤程度低。Ⅱ组地下水中 Na^+绝对含量和相对含量的增加表明其经历了更高程度的溶滤作用,与蓟县系地热水化学特征更加相似,且贫重同位素的特征呈现出一定的高程效应,表

表 1 北京市通州区地热流体的水化学同位素数据

Table 1 Hydrochemical and isotpic data of the hydrothermal fluid in Tongzhou area, Beijing

编号	出水温度(℃)	pH	$\delta^{18}O$ (VSMOW,‰)	δD (VSMOW,‰)	^{3}H (TU)	^{14}C (pMC)	$\delta^{13}C$ (VPDB,‰)	$\frac{n(^{87}Sr)}{n(^{86}Sr)}$	Sr^{2+} (mg/L)	H_2SiO_3 (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	F^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	CO_3^- (mg/L)	TDS (mg/L)
R3	42	8.1	/	/	/	/	/	/	0.102	26.8	127.0	6.1	11.0	9.0	45.2	10.4	29.8	248.0	6.0	355.1
R4	58	8.3	-10.8	-79.77	/	2.89	-5.6	0.7090	0.320	32.0	155.0	7.2	17.2	8.6	75.0	7.8	69.2	229.0	14.4	454.0
R5	46	8.3	-11.2	-81.52	/	2.34	-7.6	0.7096	0.160	27.2	131.0	4.1	10.4	4.9	51.8	9.0	19.1	251.0	8.4	351.0
R6	51	8.5	-11.2	-81.99	/	/	/	0.7107	0.190	24.0	127.0	5.3	10.4	6.2	54.9	7.8	15.9	226.0	26.4	345.9
R7	49	8.4	-11.2	-81.67	<1.3	3.42	-5.8	0.7094	0.200	25.4	124.0	5.3	11.0	6.9	50.9	7.7	30.3	243.0	18.0	359.0
R8	53	7.9	/	/	/	/	/	/	0.130	37.0	206.0	22.4	12.0	19.4	60.0	30.0	4.7	531.0	0.0	590.0
R10	48	8.0	/	/	/	/	/	/	0.173	30.4	120.0	3.7	18.0	8.5	54.5	8.0	35.7	283.0	0.0	381.9
R11	45	8.1	/	/	/	/	/	/	0.144	30.0	127.0	3.3	13.6	6.4	40.4	6.9	50.7	262.0	6.0	375.4
R12	41	7.9	-11.0	-80.80	/	2.26	-8.6	0.7103	0.260	25.1	127.0	14.6	17.0	13.7	57.7	11.4	86.7	245.0	0.0	439.2
R13	48	9.1	-11.0	-80.96	/	/	/	0.7118	0.200	27.2	205.0	17.6	6.6	4.6	60.7	16.3	14.8	330.0	48.0	498.3
R17	35	8.7	-10.6	-78.70	<1.3	/	/	/	0.141	38.5	229.0	22.1	6.0	5.6	66.1	18.8	51.8	367.0	30.0	579.1
R18	55	8.0	-9.1	-75.23	<1.3	2.00	-8.2	/	0.537	99.4	492.0	21.8	34.1	11.4	401.0	9.3	16.4	734.7	0.0	1344.1
R19	43	8.3	-11.3	-83.19	/	/	/	0.7087	0.170	25.8	138.0	3.6	11.9	4.7	44.2	6.9	55.2	221.0	14.4	375.3
J1	41	8.4	-11.4	-83.45	/	5.08	-7.1	0.7088	0.170	24.6	137.0	3.5	11.3	4.3	45.1	7.0	55.7	228.0	10.8	376.3
J2	54	8.8	-10.4	-77.98	<1.3	1.40	-8.5	0.7133	0.319	38.4	330.0	22.4	4.2	3.6	165.0	8.8	0.8	522.0	55.2	814.6
J3	52	8.1	-10.4	-76.10	<1.3	0.80	-5.4	/	0.397	32.5	169.0	25.1	6.0	14.8	57.7	17.9	20.3	358.0	13.2	478.5
J4	46	7.2	-9.2	-73.20	<1.3	2.00	-5.7	/	0.250	34.8	184.0	26.1	36.7	36.6	159.0	16.2	91.0	428.0	0.0	747.4
J5	51	7.7	/	/	/	/	/	/	0.140	33.0	137.0	18.1	11.6	15.8	66.7	15.4	11.9	354.0	0.0	438.1
J6	54	7.8	/	/	/	/	/	/	0.200	12.1	148.0	24.5	9.0	13.4	59.9	15.7	31.1	356.0	0.0	463.9
X1	91	7.6	-9.6	-78.45	<1.3	3.45	-2.2	0.7145	0.590	72.2	524.0	54.6	13.7	6.6	282.0	17.1	55.3	943.0	0.0	1407.7
D1	38	9.6	-11.2	-82.05	/	2.33	-4.9	0.7102	0.040	6.5	119.0	2.0	3.8	2.2	44.9	7.0	2.8	94.0	75.6	259.6
Y1	38	8.1	-10.5	-79.58	/	/	/	0.7130	0.220	20.0	242.0	11.9	8.0	5.2	98.3	13.1	61.1	381.0	19.2	626.6
Y2	45	7.8	-10.5	-78.52	/	1.09	-5.6	0.7153	0.320	30.2	213.0	12.9	14.5	9.9	132.0	11.4	2.8	430.0	0.0	600.1

注:/该项目未测试。TU 为非法定计量单位,1 TU=118 Bq/ m^3(下同);pMC 为^{14}C 的放射性浓度单位,即(样品的放射性比度/标准样的放射性比度)×100%; TDS 是总溶解固体。

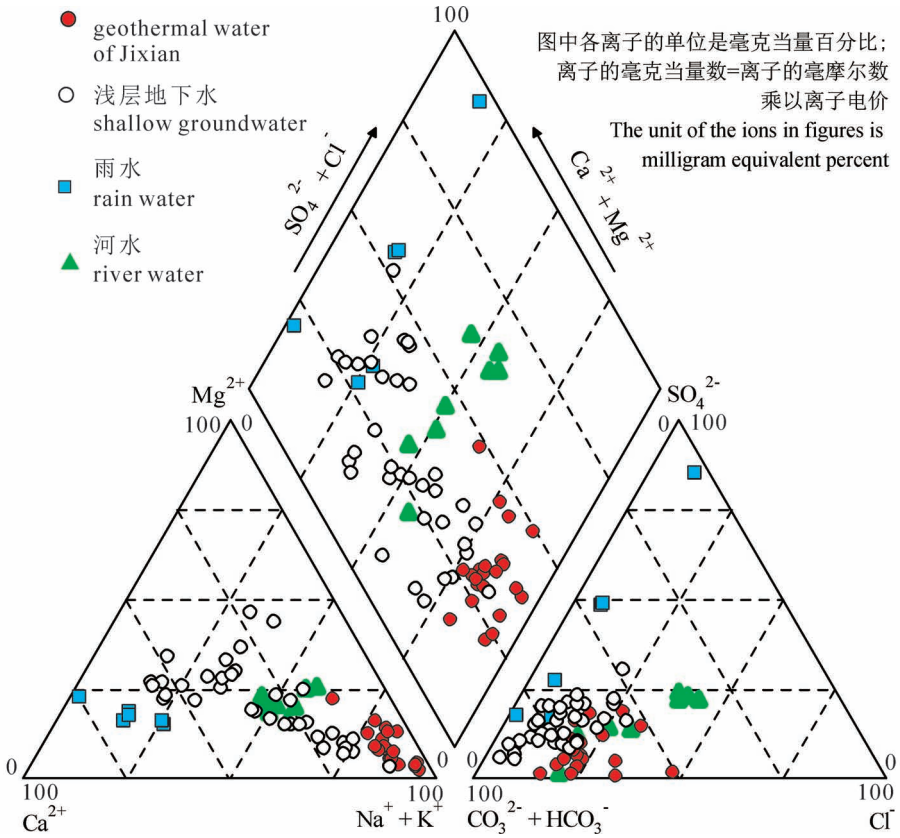


图 3 北京市通州区水化学三线图

Fig. 3 Piper diagram of the water samples in Tongzhou

明Ⅱ组第四系地下水有可能来源于山区的侧向径流补给。结合水文地质条件,通州区东部和西部的第四系松散孔隙含水层分别为潮白河—蓟运河—温榆河冲洪积扇和永定河冲洪积扇的扇前缘,Ⅱ组的补给来源可能为北部及西北部山区的侧向径流补给(北京市地质矿产勘查开发局和北京市水文地质工程地质大队,2008)。

结合区域水文地质条件,以及地热水同位素特征揭示的地热水补给过程中的高程效应,可利用地下水补给高程计算公式计算地热水补给高程:

$$H=\frac{\delta^{18}O_r-\delta^{18}O_a}{grad^{18}O_r}+h \quad (1)$$

上式中:H 为补给高程;$\delta^{18}O_r$ 为补给高程处大气降水稳定同位素组成,取地热水的 $\delta^{18}O$

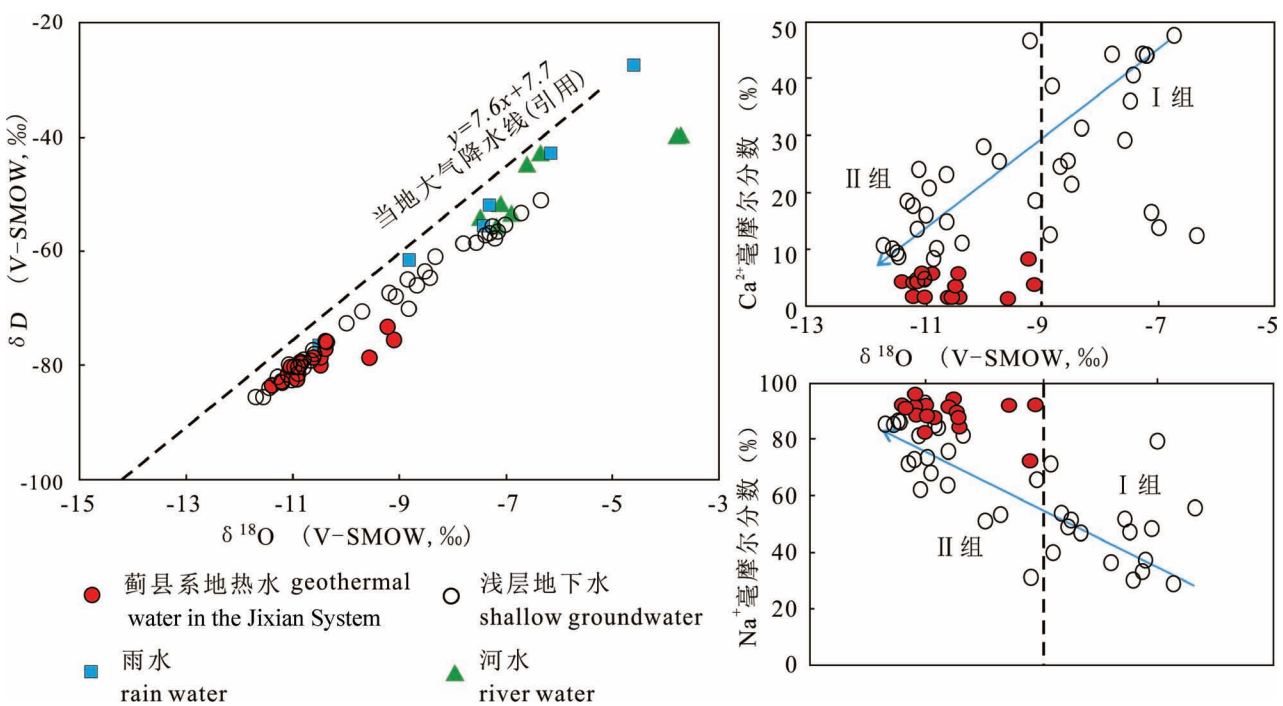


图 4 北京市通州区水稳定同位素分布图

Fig. 4 Relationship between $\delta^{18}O_{V-SWOM}$ and δD_{V-SWOM} of water samples in Tongzhou

均值-10.5 ‰;$\delta^{18}O_a$ 为当地大气降水平均组成,取-7.5 ‰;h 为当地平均地面高程,取通州区平均地面高程 10 m;$grad^{18}O_r$ 为流域内降水 $\delta^{18}O$ 随高程变化的梯度值,取-0.2 ‰/100 m(Liu Jianrong et al., 2009)。可知补给高程为 1510 m。结合区域水文地质条件,可推测通州区地热水的补给来源为北京市部及西北部高程为 1510 m 左右的山区。

3.2 地下水年龄与循环途径

3.2.1 同位素年龄

本文利用^3H 和^{14}C 同位素技术确定地热水的年龄,结果显示地热水中^3H 含量均低于检测限,^{14}C 含量小于 5.08 pMC。

^{14}C 测年的基础是测量给定样品中母放射性核(^{14}C)的减少。从本质上看,地下水^{14}C 定年并不是测定水的年龄,而是测定地下水中溶解无机碳的年龄。假设:地下水含有放射性同位素^{14}C,其一旦进入地下水系统,其^{14}C 得不到新的补充,^{14}C 就开始按衰变规律而衰减,地下水定年可根据衰变方程:

$$t=\frac{1}{\lambda}\ln\frac{A_0}{A_t}=8267\ln\frac{A_0}{A_t} \tag{2}$$

式中:t 为地下水表观年龄(a);λ = 12.1×10^{-6}/a,为^{14}C 衰变常数;A_0 为母核初始放射性浓度(pMC),取 100 pMC(Clark and Fritz, 1997);A_t 为样品^{14}C 的放射性浓度(pMC)。

如果来自土壤 CO_2 的^{14}C 在流动过程中一直保存在地下水中,没有被稀释,那么可以用式(2)来定年,但通州区地热水储层为碳酸盐岩地层,碳酸盐岩矿物多为地质历史时期形成,其^{14}C 浓度一般接近 0 pMC,在水岩作用影响下,含水介质的碳酸盐矿物溶解进入地下水会使地下水中^{14}C 浓度减小,即所谓“稀释反应”。为了对校正碳酸盐岩热储层对地热水^{14}C 定年的影响,本文使用了 Pearson(1965)同位素 $\delta^{13}C$ 混合模型计算出稀释因子 q,考虑了开放系统条件下碳酸盐溶解过程中^{14}C 放射性 DIC 的加入以及随后在封闭系统条件下发生的^{14}C 稀释。

$$q=\frac{\delta^{13}C_{DIC}-\delta^{13}C_{card}}{\delta^{13}C_{soil}-\delta^{13}C_{card}} \tag{3}$$

式中:$\delta^{13}C_{DIC}$ 为地下水^{13}C 测量值;$\delta^{13}C_{soil}$ 为土壤 CO_2 的 $\delta^{13}C$(通常接近-23 ‰);$\delta^{13}C_{card}$ 为被溶解的方解石的 $\delta^{13}C$(通常接近 0 ‰)。

经过稀释校正,地下水定年的衰变方程变为:

$$t=\frac{1}{\lambda}\ln\frac{qA_0}{A_t}=8267\ln\frac{qA_0}{A_t} \tag{4}$$

研究区内地热水^{14}C 校正模型年龄见表 2。区内地热水的校正年龄分布在 8.4~27 ka 范围内,表明区内地热水属于老水循环更新能力差。且从平面上看地热水年龄存在从西北向东南增加的趋势,西北部 R4 井和东南部 Y2 井的视年龄分别为 18 ka 和 27 ka,在 A—A’剖面上,R4 井到 Y2 井之间,蓟县系热储层内地热水的运移速度约 1.5 m/a。再往东,夏垫断裂影响范围内地热年龄变轻,钻遇到夏垫断裂的 X-1 井地下水视年龄仅为 8.4 ka。

表 2 通州区地热水^{14}C 校正模型年龄

Table 2 ^{14}C corrected model age of geothermal water in Tongzhou

编号	井深(m)	直观年龄(ka)	Pearson 模型校正年龄(ka)	编号	井深(m)	直观年龄(ka)	Pearson 模型校正年龄(ka)
R4	2501	29	18	J2	2800	35	27
R5	2679	31	22	J4	2801	32	21
R7	2203	28	17	X1	3589	28	8.4
R12	2405	31	23	D1	2109	31	18
R18	3203	32	24	Y2	2502	37	26
J1	2507	25	15				

3.2.2 地热水流系统中的锶同位素

大气降水携带的 Sr^{2+} 浓度通常很低,地下水中的 Sr^{2+} 浓度取决于含水介质中的 Sr 含量和水—岩相互作用程度(Shand, 2009; 翟远征等, 2011)。研究区大气降水中 Sr^{2+} 的平均质量浓度为 0.008 mg/L。地热流体和第四系地下水中的 Sr^{2+} 质量浓度分别分布在 0.040 ~0.590 mg/L 和 0.195 ~0.551 mg/L 之间,均值分别为 0.230 mg/L 和 0.339 mg/L。

自然界中的 Sr 不能以单质形态存在,主要存在形式为类质同象。锶和钙在元素周期表中同属一个主族且位置相邻,Sr 常常以分散状态存在于含钙矿物中,如碳酸盐、磷灰石、角闪石和斜长石等。由于 Sr 和 Ca 的地球化学亲合性,在地球化学研究中,常认为它们表现出一致的地球化学行为(Shand et al., 2009)。通州区地下水中 Sr^{2+} 浓度的变幅远小于 Ca^{2+},但 Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 两者大体上呈正相关关系(图 5),表明降水进入含水介质后,水中的 Sr 和 Ca 经历了大致相似的水文地球化学作用。与第四系地下水相比,地热水中的 Sr^{2+} 也伴随着 Ca^{2+} 增加而增加,但 Sr^{2+} 的增加速率更大。

地热水中 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 值分布在 0.7087 ~

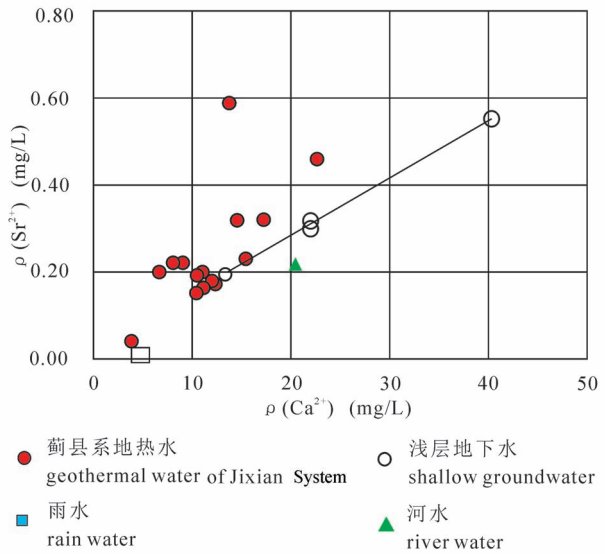


图 5 北京市通州区水体中 Sr^{2+}—Ca^{2+}关系图

Fig. 5 Sr^{2+} versus Ca^{2+} in water samples in Tongzhou

0.7153 范围内。与之相比,研究区内大气降水(0.7107~0.7115)、河水(0.7100)和第四系地下水(0.7092~0.7097)的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值的变幅都较小,可能原因是这几种水体中的 Sr 元素来源单一或者地热水经历了不同的水—岩相互作用。空气中的粉尘($n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值为 0.7111)是北京大气降水中锶的重要来源(Xu Zhifang and Han Guilin, 2009)。地下水中的锶来源主要包括风源沉积物、土壤中的硅酸盐、碳酸盐或硫酸盐等矿物的风化释放产物和含水介质。碳酸盐、硫酸盐来源锶的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值约为 0.7080,硅酸盐来源锶的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值一般为 0.7160~0.7200(Gaillar et al., 1999; Philippe, 2006; Min Maozhong et al., 2007)。通州区第四系地下水中$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值与碳酸盐岩风化来源的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$比值相近,地下水中的锶可能来源于碳酸盐岩中锶元素的溶解。地热水中$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值落在碳酸盐岩和硅酸盐矿物来源的锶同位素组成之间,且当 Sr^{2+} 含量较高时,锶同位素组成更接近硅酸盐矿物来源锶的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值(图 6a)。但研究区蓟县系雾迷山组热储中白云石含量高,只含少量石英和方解石(孔祥军, 2019),从含水层介质的组成分析,碳酸盐岩的溶解应是本区地热水中锶的主要来源。

Sr^{2+}/Ca^{2+} Vs $^{87}Sr/^{86}Sr$ 关系更清楚了展示了地热水中锶同位素的富集过程(图 6b)。当地热水 Sr^{2+}/Ca^{2+} 比值小(0.01~0.02)时,$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值(0.7087~0.7107)接近碳酸盐岩来源的$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值(0.7080)。而 Sr^{2+}/Ca^{2+} 值较高(>0.02)时,$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值显著增加(0.7118~0.7153)。且两者的分布表现出一定的地域差别,前者样品均位于通州区西北,而后者均分布在通州区东南部。结合研究区的地下水流场,推断高锶值可能由锶的时间积效应导致。前人研究表明:自然界 Sr 的 4 个稳定同位素中(^{88}Sr、^{87}Sr、^{86}Sr、^{84}Sr),只有^{87}Sr 是放射源的,可由^{87}Rb 经过 β^- 衰变而来,随着 Rb 的衰变,在含 Rb 的岩石和矿物中,^{87}Sr 的含量可作为时间函数连续增加,表现出时间累积效应。

根据这个特点笔者等绘制了 Sr^{2+} 含量和$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$的平面分布图(图 7),两者呈现出一致的从西北到东南增加变化趋势(图 7a、b),而区

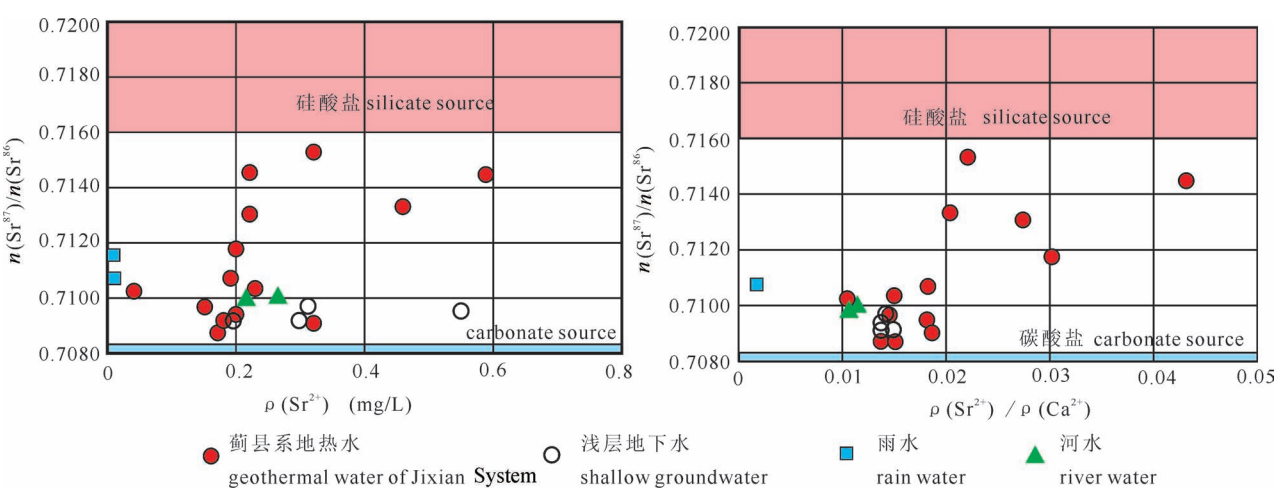


图 6 北京市通州区水体中$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$-$\rho(Sr^{2+})$(a)和$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$-$\rho(Sr^{2+})\rho(Ca^{2+})$(b)相关图

Fig. 6 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ versus $\rho(Sr^{2+})$(a) and $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ vs. $\rho(Sr^{2+})\rho(Ca^{2+})$(b) in water samples in Tongzhou

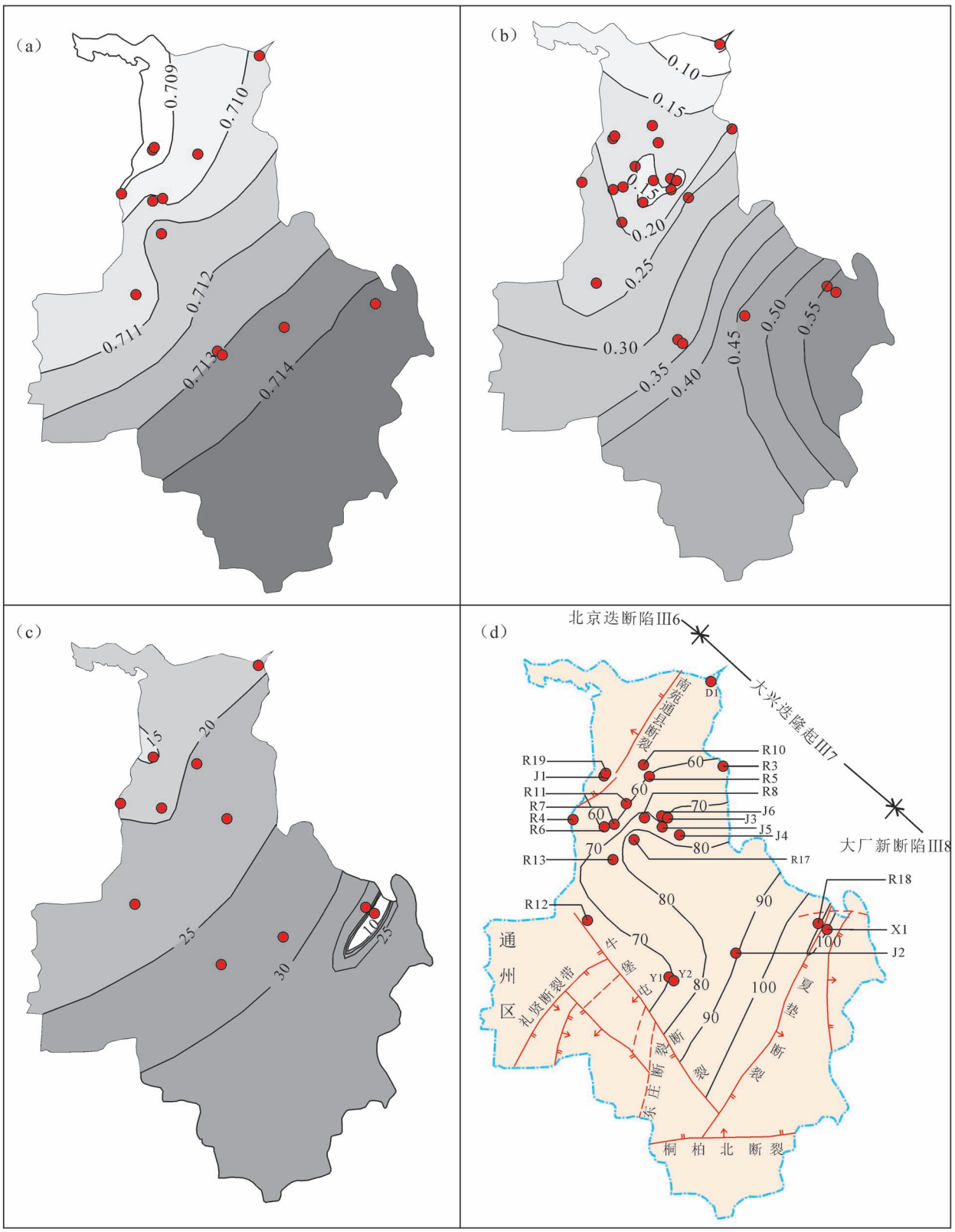


图 7 北京市通州区地热水中$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$(a)、$\rho(Sr^{2+})$(b)、^{14}C 年龄(c)和热储温度(d)分布等值线图

Fig. 7 Distribution contour map of $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ (a), $\rho(Sr^{2+})$ (b), ^{14}C corrected model age (c) and thermal storage temperature (d) in water samples in Tongzhou

域内^{14}C 视年龄也呈现出相同的分布规律(图 7c)。三者相同的分布规律揭示了地热水中的锶的演化规律:一方面,沿地下水流方向,水—岩反应强度加大导致地热流体中 Sr^{2+} 含量增加;另外,随着地下水滞留时间的延长,时间累积效应导致地热流体中 $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ 值增加。

3.3　地温计与热储温度

地温计方法是利用地下热水中的某些化学组分的含量或者同位素值与温度的关系,直接估算深部热储温度。目前常用的地温计主要有阳离子地温计、SiO_2 地温计、气体地温计、同位素地温计这四大类,应用条件各不同(Fournier, 1997)。本文主要利用阳离子地温计和 SiO_2 地温计计算研究区内热储温度。计算结果显示:不同计算方法的 Na^+/K^+ 和 $Na^+—K^+—Ca^{2+}$ 阳离子地温计的估算结果均偏高,玉髓地温计的估算结果偏低(表 2)。另外,通州区大部分地热井的出水温度均低于 100 ℃,蒸汽足量损失的 SiO_2 地温计不适宜于评价热储温度。K^+/Mg^{2+} 阳离子地温计和无蒸汽损失的 SiO_2 地温计较适宜于评价通州地区热储层的热储温度(表 2)。本文以 K^+/Mg^{2+} 阳离子地温计和无蒸汽损失的 SiO_2 地温计计算结果为参考,取其平均值为热储温度,则研究区内热储温度分布在 34 ~ 112 ℃ 范围内,均值为 50 ℃。

热储温度超过 100 ℃的两眼井均位于大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)和大厂新断陷(Ⅲ$_8$)分界线——夏垫断裂上。其余地热井均位于大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)内,排除一个异常点(D1),因其热储温度估算值低于出水温度与井底实测温度,热储温度分布在 57.4 ~ 89.6℃内,平均温度为 68.3℃。大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)内,垂向上热储温度并没有表现出随储层平均深度增加而增加的趋势(图 8)。大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)西北部热储平均埋深较大(2534~2983 m),热储温度却较低(57.4 ~66.6℃),均值为 59.9℃(图 8)。大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)东南部热储埋藏变浅(2145~2260 m),热储温度却升高(61.2 ~ 86.5 ℃),均值为 72.4 ℃。笔者等根据这个特点绘制了热储温度平面分布图(图 7d),更直观地表明了热储温度从西北向东南增加的趋势。造成这一现象的可能原因是,同一储层内,沿着地下水流方向上,地热流体的滞留时间增加,与

表 3 通州区各地热井的热储温度

Table 3 Results of reservoir temperature in Tongzhou by different geothermometer

编号	井深(m)	出水温度(℃)	钻井测温		热储温度估算(℃)								
			深度(m)	温度(℃)	阳离子地温计					SiO_2 地温计			估算值
					Na/K	Na/K	Na/K	Na—K—Ca	K/Mg	玉髓	蒸汽足量损失	无蒸汽损失	
R3	1827	42	1800	43	161.7	180.3	131	99.4	57.7	32.6	70	64.6	61.2
R4	2501	58	2417	63	159.4	178.1	128.4	96.9	61.8	39.7	76	71.4	66.6
R5	2679	43	2679	57	133.6	153.4	99.8	86.4	55.4	33.1	70.5	65.1	60.3
R6	2213	51	2210	53	152	171	120.1	95.4	58.6	28.3	66.3	60.5	59.6
R7	2203	49	2200	54	154	173	122.4	94	57.5	30.5	68.2	62.6	60.1
R8	2699	53	2670	57	224.3	239.1	203.7	193.6	78.6	45.8	81.2	77.2	77.9
R10	2509	48	2460	53	133.3	153.1	99.5	70.5	47.7	37.6	74.3	69.4	58.6
R11	2480	45	2450	56	122.8	142.9	88	73	48.1	37.1	73.8	68.9	58.5
R12	2405	41	2350	45	229.2	243.7	209.7	184.4	72.5	30	67.8	62.1	67.3
R13	2401	48	2400	52	204.2	220.4	179.9	185.7	90.7	33.1	70.5	65.1	77.9
R17	2468	35	2460	58	214	229.5	191.4	195.4	94.1	47.5	82.6	78.9	86.5
R18	3203	55	3200	84	155.9	174.7	124.5	152.6	84.5	94.6	120.5	122.7	103.6
R19	2370	43	/	/	124	144.1	89.3	80.2	53.4	31.1	68.7	63.2	58.3
J1	2507	41	2500	55	121.9	142.1	87	79.7	53.4	29.2	67.1	61.4	57.4
J2	2800	54	2800	64	185.9	203.2	158.5	185.7	100.4	47.4	82.5	78.8	89.6
J3	3001	52	3000	63	253.4	266	239.1	215.3	84.8	40.3	76.6	72	78.4
J4	2801	46	2800	54	248.9	261.8	233.6	196	74.6	43.2	79	74.8	74.7
J5	2806	51	2800	57	242.1	255.6	225.2	197.3	75.9	41	77.1	72.6	74.3
J6	3002	54	3000	59	264.4	276	252.8	215.1	85.4	4.2	45.2	37	61.2
X1	3589	91	3425	90	220.5	235.6	199.2	208.2	117.3	77.2	106.8	106.8	112.1
D1	2109	38	2100	41	101.2	122	64.8	84.5	49.2	-14.4	28.3	18.4	33.8
Y1	2106	38	2100	46	162.9	181.4	132.3	157.9	79.3	21.5	60.4	53.9	66.6
Y2	2502	45	2500	51	177.5	195.2	148.9	161.2	73.5	37.3	74	69.2	71.4

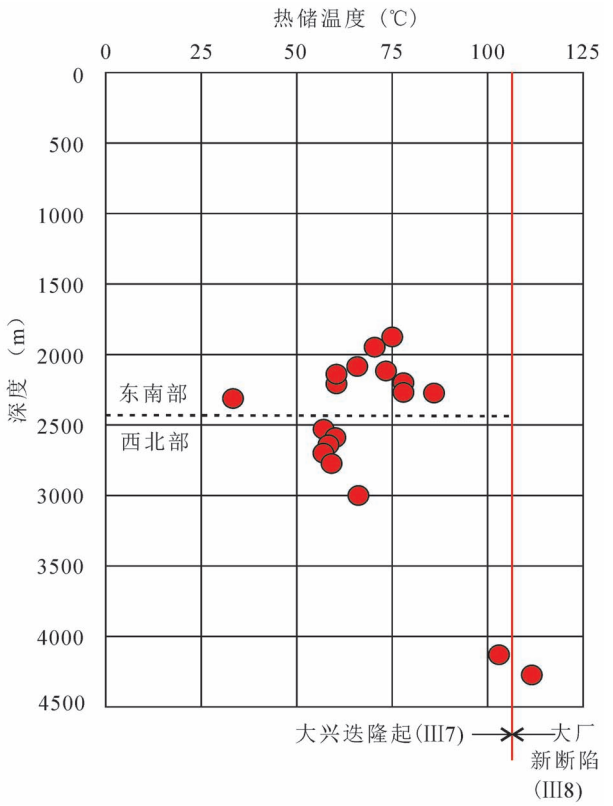


图 8 通州区地热热储温度分布图

Fig. 8 Reservoir temperature vs. depth diagram of geothermal in Tongzhou District

岩石的热交换更充分,进而导致热储温度增加。

4 结论

(1) 水稳定同位素表明通州区蓟县系热储层中地热水来源于大气降水补给,结合通州区第四系地下水补给—径流条件与同位素及水化学特征之间的关系,地热水贫^{18}O同位素可解释为高程效应,地下水补给高程公式可计算出地热水平均补给高程为1510 m,补给区可能位于北京市北部及西北部山区。

(2) ^{14}C可有效计算通州区蓟县系热储中地热水年龄。研究区西部,大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)内地热水年龄从西北(18 ka)向东南(28 ka)增加,运移速度约1.5 m/a。但研究区东部,大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)和大厂新断陷(Ⅲ$_8$)交界的夏垫断裂上,地下水的运移速率加快,断裂附近地下水视年龄变轻。

(3) Sr^{2+}含量和Sr同位素可有效示踪通州区蓟县系热储中地热水的流通路径和水—岩相互作用程度。区域内,随着地热水年龄的增加,径流路径上,地热水中的Sr^{2+}含量增加,$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$值增加。地热水中锶同位素可视为两个过程的叠加:蓟县系碳酸盐岩中锶的溶解与^{87}Rb的衰减,后者呈现出明显的时间累积效应。

(4) K^+/Mg^{2+}阳离子地温计和无蒸汽损失的SiO_2地温计可合理估算热储温度。研究区东部,大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)和大厂新断陷(Ⅲ$_8$)交界夏垫断裂上的两眼地热井的热储温度均值达107.8℃。研究区西部,大兴迭隆起(Ⅲ$_7$)内热储平均温度为68.3℃,且存在随地下水径流方向上热储温度升高的特点。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

北京市地质矿产局. 1982. 北京市区域地质志. 北京: 地质出版社: 1 ~ 598.

北京市地质矿产勘查开发局, 北京市水文地质工程地质大队. 2008. 北京地下水. 北京:北京大地出版社, 1 ~ 368.

郭永海, 沈照理, 钟佐燊. 2002. 河北平原深层碱性淡水形成的水文地球化学模拟——以保定、沧州地区为例. 地球科学, 27(2): 157 ~ 162.

孔祥军. 2019. 浅析北京通州地区雾迷山组热储微观特征. 城市地质, 14(4): 30 ~ 36.

刘凯, 王珊珊, 孙颖, 崔文君, 朱德莉. 2017. 北京地区地热资源特征与区划研究. 中国地质, 44(6): 1128 ~ 1139.

马致远, 范基姣. 2005. 陕西渭北东部岩溶地下水中硫酸盐的形成. 煤田地质与勘探, 33(3): 45 ~ 52.

叶萍, 金勤胜, 周爱国, 刘存富, 蔡鹤生, 甘义群. 2008. 河北平原地下水锶同位素形成机理. 地球科学(中国地质大学学报), 33(1): 137 ~ 144.

于湲. 2006. 北京城区地热田地下热水的水化学及同位素研究. 导师: 周训. 北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~67.

袁利娟, 孔祥军, 高剑, 沈鹏飞, 何云成, 冯浩, 李文, 郝伟俊. 2020. 北京市延庆地热田成因模式. 地质论评, 66(4): 933~941.

翟远征, 王金生, 左锐, 腾彦国. 2011. 北京平原区第四系含水层中水—岩作用的锶同位素示踪. 科技导报, 29(6): 17 ~ 20.

张进平,袁利娟. 2018. 夏垫断裂带对地热资源分布的影响——以通州西集地区为例. 城市地质, 13(3):15 ~ 20.

邹登亮, 张进平, 袁利娟, 张沁瑞, 石涵静. 2015. 北京市通州区首次发现中温地热资源. 城市地质, 10(4): 52.

Aas Wenche, Shao Min, Jin Lei, Larssen Thorjorn, Zhao Dawei, Xiang Renjun, Zhang Jinhong, Xiao Jinsong, Duan Lei. 2007. Air concentrations and wet deposition of major inorganic ions at five nonurbansites in China, 2001 ~ 2003. Atmospheric Environment, 41:1706 ~ 1716.

Allison G B, Barnes C J, Hughes M W, Leaney F W J. 1984. Effect of climate and vegetation on oxygen-18 and deuterium profiles in soils. In: Isotope Hydrology 1983, IAEA Symposium 270, September 1983, Vienna: 105 ~ 123. Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources. 1982 #. Regional Geology of Beijing. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 598.

Beijing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development,

Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology. 2008#. Beijing Groundwater. Beijing: China Earth Press: 1 ~ 368.

Clark I, Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrology. New York: Lewis Publishers.

Deng Wenping, Yu Xinxiao, Jia Guodong, Li Yajun, Liu Yujie. 2013. An analysis of characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in Jiufeng Mountain areas of Beijing. Advances in Water Science, 24(5): 642 ~ 650.

Fournier R O. 1997. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics, 5: 41 ~ 50.

Gaillardet J, Dupre B, Louvat P, Allegre C J. 1999. Global silicate-weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. Chemical Geology, 159(1): 3 ~ 30.

Guo Yonghai, Shen Zhaoli, Zhong Zuoshen. 2002&. Hydrogeochemical modeling for the formation of deep-lying alkaline fresh groundwater in Heibei Plain : a case study in Baoding and Cangzhou districts. Earth Science, 27(2): 157 ~ 162.

Kong Xiangjun. 2019&. Discussion on microscopic features of geothermal reservoirs from Wumishan formation in Tongzhou of Beijing. Urban Geology, 14(4): 30 ~ 36.

Li Jie, Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Wang Shufang, Bai Guoying, Zhao Hongyi, Zhou Dong, Sun Feng, Yang Zhongshan. 2018 Groundwater isotopes biased toward heavy rainfall events and implications on the Local Meteoric Water Line. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123: 6259 ~ 6266.

Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, Sun Xiaomin, Liu Xin, Wang Shiqin. 2009. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources. Chinese Science Bulletion, 55(2): 200 ~ 211.

Liu Kai, Wang Shanshan, Sun Yin, Cui Wenjun, Zhu Deli. 2017&. Characteristics and regionalization of geothermal resources in Beijing. Geoglogy in China, 44(6): 1128 ~ 1139.

Ma Zhiyuan, Fang Jijiao. 2005&. Sulphate forming from groundwater in eastern Weibei karst area, Shaanxi Province. Coal Geology & Exploration, 33(3): 45 ~ 52.

Min Maozhong, Peng Xinjian, Zhou Xianlin, Qiao Haiming, Wang Jinping, Zhang Li. 2007. Hydrochemistry and isotope compositions of groundwater from the Shihongtan sandstone-hosted uranium deposit, Xinjiang, NW China. Journal of Geochemical Exploration, 93(2): 91 ~ 108.

Pearson F J. 1965. Use of $^{13}C/^{12}C$ ratios to correct radiocarbon ages of material initially diluted by limestone. In: Proceeding of the 6th International Conference on Radiocarbon and Tritium Dating, Pulman, Washington: 357.

Philippe N. 2006. Water—granite interaction: clues from strontium, neodymium and rare earth elements in soil and waters. Applied Geochemistry, 21: 1432 ~ 1454.

Shand P, Darbyshire P F, Love A J, Edmunds W M. 2009. Sr isotopes in natural waters: Applications to source characterization and water—rock interaction incontrasting landscapes. Applied Chemistry, 24(4): 574 ~ 586.

Xu Zhifang, Han Guilin. 2009. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing, China. Atmospheric Environment, 43(12): 1954 ~ 1961.

Ye Ping, Jin Qinshen, Zhou Aaiguo, Liu Cunfu, Cai Hesheng, Gan Yiqun. 2008&. Formation Mechanism of Sr Isotopes in Groundwater of Hebei Plain. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 33(1): 137 ~ 144.

Yu Yuan. 2006&. A Study of Hydrochemistry and Isotopes in Thermal Groundwater in the Urban Geothermal Fileld, Beijing. Beijing: China University of Geosciences(Beijing). Supervisor: Zhou Xun. Thesis of Master degree. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1 ~ 67.

Yuan Lijuan, Kong Xiangjun, Gao Jian, Sheng Pengfei, He Yuncheng, Feng Hao, Li Wen, Hao Weijun. 2020&. Genetic model of the Yanqing geothermal field, Beijing. Geoglogical Review, 66(4): 933 ~ 941.

Zhai Yuanzheng, Wang Jinsheng, Zuo Rui, Teng Yanguo. 2011&. Strontium isotopic tracing of water—rock interaction in Quaternary aquifer in Beijing Plain. Science & Technology Review, 29(6): 17 ~ 20.

Zhang Jinping, Yuan Lijuan. 2018&. Effection of Xiadian fault on geothermal resource distribution——A case study in Xiji District. Urban Geology, 13(3): 15 ~ 20.

Zou Dengliang, Zhang Jinping, Yuan Lijuan, Zhang Qinrui, Shi Hanjing. 2015#. First discovery of medium-temperature geothermal resources in Tongzhou District, Beijing. Urban Geology, 10(4): 52.

Hydrochemical and isotopic characteristics of geothermal fluids in Tongzhou District, Beijing, and their geothermal significance

YUAN Lijuan, ZHANG Jinping, HE Yuncheng, KONG Xiangjun, GAO Jian

Beijing Geothermal Research Institute, Key Laboratory of Shallow Geothermal Energy, Ministry of Natural Resources, Beijing, 100012

Objectives: Tongzhou, as a sub-center of Beijing city, is rich in geothermal resources and has a huge demand for clean energy for regional construction. This paper aims to grasp the hydrochemical isotopic characteristics of geothermal fluids in the area, understand the recharge, circulation, and thermal storage temperature distribution of the Jixian karst geothermal system, and provide scientific support for the development and protection of geothermal resources in the city.

Methods: Based on a full understanding of the tectonic and geological conditions in the study area, this paper uses water chemistry and ^{2}H, ^{18}O, ^{3}H, ^{14}C, and $n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ isotopic tracers to carry out the work.

Results: In the western part of Tongzhou district, within the Daxingdian uplift tectonic unit, the water age increases from northwest (18 ka) to southeast (27 ka) with a transport rate of about 1.5 m/a, and the reservoir

temperature increases from 57.4 ℃ to 86.5 ℃. The Xiadian fault in the southeast is a hydraulic and thermal conductivity fault on which the geothermal water age decreases to 8.4 ka, while the reservoir temperature increases to 107.8 ℃. Both strontium content and strontium isotope values in geothermal water increase along the direction of groundwater runoff, revealing the superimposed effects of two processes: dissolution of strontium in Jixian system carbonates and decay of ^{87}Rb, the latter showing a significant time-accumulation effect, which is more evident in the southeastern part of the study area.

Conclusions: The recharge source is atmospheric precipitation in the northwestern or northern mountainous areas of Beijing, with an average recharge elevation of 1510 m. The age and temperature of geothermal water in the thermal reservoir show obvious tectonic control characteristics. Regionally, changes in strontium content and strontium isotope values can effectively trace the transport of geothermal fluids and the degree of water—rock interaction.

Keywords: Tongzhou, Beijing; geothermal fluid; hydrochemistry; strontium isotope; reservoir temperature

Acknowledgements: This article was supported by Study on the Optimized Exploitation Model of Geothermal Resources in Tongzhou District, Beijing (No. PXM2019_158309_000005)

First author: YUAN Lijuan, female, born in 1985, Ph. D., Senior engineer, mainly engaged in geothermal geology; Email: yuanlijuan2010@163.com

Manuscript received on: 2021-04-12; Accepted on: 2021-06-28; Network published on: 2021-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.07.045 **Edited by**: ZHANG Yuxu

GEOLOGICAL REVIEW

Vol. 67 No. 5 2021

CONTENTS

Scholarly Discussion

My view on the formation mechanism of the Yoredale cycle——A case study of Late Paleozoic coal formation deposits in the North China Craton ····· SHI Yanqiang (1206)

Uranium and thorium elements are loss in the deep inside the earth? ——Disscusion from the uranium and thorium contents of zircon minerals from the Caledonian igneous plutons in the Qinling Orogen ····· WU Hao, LI Xiaogang, WU Chen, XIA Yu, ZHOU Kenken, XIONG Guoqing, YAO Xueting (1229)

Late Triassic to Early—Middle Jurassic depositional environment transformation process study in the eastern Qiangtang Basin: evidence from the record by the core samples ····· ZENG Shengqiang, WANG Jian, CHEN Wenbin, FU Xiugen, SONG Chunyan, SUN Wei, WANG Dong (1244)

Zircon U-Pb age, geochemical features of the Shenlin granite, eastern Qinling Orogenic Belt, and its implications for tectonic settings ····· LIANG Tao, LU Ren, LIU Xiaoli (1261)

Geochemical characteristics of mudstones and its provenance and tectonic setting during the Ordovician—Silurian period in northern margin of Yangtze Block ····· LIU Chunlai, XIONG Guoqing, DONG Guoming, CUI Wei (1279)

Age and geochemical characteristics of Qingtoushan granite in Fengqing area, Western Yunnan——Transition evidences for collision convergence to extension of the Paleo-Tethys Ocean ····· TIAN Sumei, LIU Junping, FAN Zhenhua, BAO Jiafeng, SUN Baidong, YU Saiying, WU Jialin, ZHU Xunzao, SONG Domghu (1295)

Study on three-dimensional gold enrichment regularity and metallogenic model of Nibao large-scale gold deposit, southwestern Guizhou ····· CAO Shengtao, ZHENG Lulin, WHI Huairui, CHEN Jun, LI Junhai (1308)

Zircon U-Pb age, petro-geochemical and mineralization characteristics of Keshuling granites in southern Jiangxi Province ····· LI Wei, LIU Cuihui, TAN You, CHEN Wei, LU Jie, YIN Jiyang, CHEN Zaiwei (1320)

Enrichment mechanism of vanadium in Lower Cambrian black rock series in Sansui, southeastern Guizhou ····· XUE Zhongxi, GAO Junbo, YANG Ruidong, XU Hai, CHEN Jun, GAO Lei (1330)