

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.03.09

汤山地下水补给及受轨道交通工程的影响

徐成华^{1,2}, 于丹丹¹

(1. 江苏省地质矿产局第一地质大队, 江苏 南京 210041; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究汤山地下水接受外源水补给的证据及宁句线城际轨道交通工程汤山段对地下热水资源的影响, 对汤山地下热水和冷水的¹⁸O、Sr同位素比值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)及水化学指标进行分析, 并与河水、库水进行对比。结果表明, 汤山地下水并非接受当地降水补给, 而是来自于具有同位素贫化特征的外源水, 外源的深循环水在汤山两端沿断裂构造向地表排泄, 形成温泉。宁句线城际轨道交通工程对汤山温泉的补给与径流条件不会产生影响。

关键词: Sr同位素; 轨道交通工程; 地下水补给源; 汤山

中图分类号: X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2018)03-0057-05

Geothermal water recharge in Tangshan and impact of rail transit engineering

XU Chenghua^{1,2}, YU Dandan¹

(1. The 1st Geological Brigade of Jiangsu Geology & Exploration Bureau, Nanjing 210041, China;

2. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the evidence of the geothermal water recharge in Tangshan supplied by the extraneous source and the impact of the Nanjing-Jurong intercity rail transit engineering to the geothermal water resource, ¹⁸O, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, and hydrochemistry of the geothermal water and underground cold water were analyzed and compared with those of surface water and reservoir water. The results show that the geothermal water in Tangshan is not supplied by local precipitation, but supplied by extraneous water with the characteristics of isotope depletion. The extraneous water flows out at both ends of the Tangshan Mountain along the fault structure after long distance and deep circle and becomes hot springs. The Nanjing-Jurong intercity rail transit engineering will not affect the recharge and runoff of the geothermal water in Tangshan.

Key words: strontium isotope; rail transit engineering; geothermal water recharge source; Tangshan

汤山温泉位于古都南京东郊, 日出水量 5 000 t, 常年水温 35 ~ 65℃, 含 30 多种矿物质和微量元素, 是世界四大温泉之一, 位居中国温泉疗养区之首。汤山温泉有 1 500 多年的历史, 于 2012 年被世界温泉及气候养生联合会授予“世界著名温泉小镇”称号, 并确定为“世界温泉论坛”永久会址。随着城市交通的高速发展, 南京、句容之间的城际轨道交

通工程将通过汤山温泉地区, 由于轨道交通建设将改变汤山地区地下水原有的补给、径流与排泄方式, 汤山镇修建城际轨道与相关的建设工程是否会干扰或破坏汤山温泉引起了政府与相关部门的高度重视。

关于温泉地下水的补给、径流与排泄关系存在两种不同的认识: 传统的区域水文循环的观点认为,

汤山温泉的地下水补给来自于本流域周边山区的降水,降水通过裂隙与破碎带入渗到寒武系与奥陶系的碳酸盐岩地层中被岩层加热,地下水的循环深度为2.9 km^[1-2];另一种观点认为,地下水存在深循环形式,在新生代火山岩喷发地区地下水存在跨流域的补给、径流与排泄方式^[3],如巴丹吉林沙漠的湖水接受青藏高原北缘祁连山冰川融雪的渗漏补给^[4],经水量平衡与同位素分析确定,长白山天池水及聚龙泉等温泉水来自于4 000 km 以外的羌塘盆地的渗漏补给^[5]。深循环地下水中偏硅酸浓度较高,Sr 同位素比值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)偏低,氡氧同位素与水化学指标都与当地降水存在明显差异^[6]。

新近纪期间,江苏、安徽一带的加山-六合火山群曾发生了两期火山喷发,玄武岩的喷发范围包括南京方山等地区^[7],汤山也位于火山活动的范围内,属于新生代火山玄武岩地下水的控制范畴。为了确认汤山温泉的补给、径流与排泄方式,对汤山地下水与冷水中的¹⁸O、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 及主要化学成分进行分析,同时分析河水与库水的¹⁸O 及水化学指标,以期通过排他性的证据确认温泉水的补给、径流与排泄方式,并从同位素与地球化学角度分析轨道交通工程对温泉的影响。

1 地热水补给来源分析

1.1 ¹⁸O 分析

汤山地区共布置 59 个取样点,获取地表水、地下冷水和地热水样品 66 件。地表水主要采自汤泉水库和汤水河,地热水采自热水开采井,地下冷水主要采自汤山周边的民用浅井,将区内常温地下水统

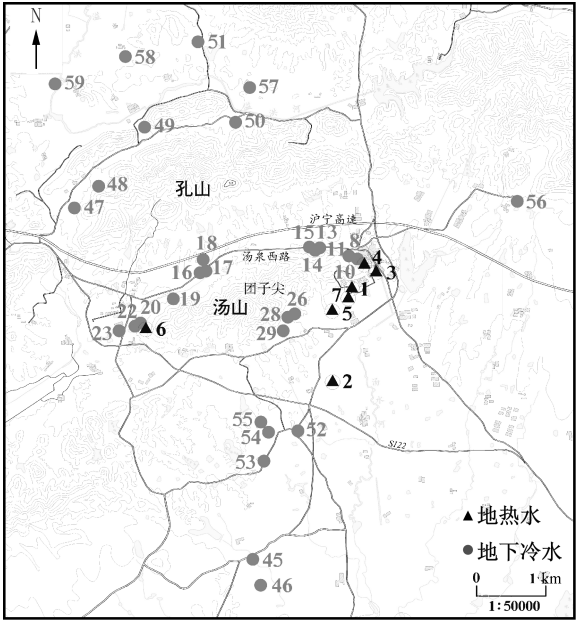


图1 取样点基本情况

称为地下冷水,取样点基本情况见图 1,水化学及同位素监测结果见表 1。

表1 汤山地区不同水体水化学及同位素监测结果

编号	水样类型	井深/ m	温度/ ℃	$\rho(\text{Sr})/$ ($\text{mg}\cdot$ L^{-1})	$\rho(\text{Si})/$ ($\text{mg}\cdot$ L^{-1})	$\delta^{18}\text{O}/$ ‰	$^{87}\text{Sr}/$ ^{86}Sr
1	地热水	336	48.3	6.921	24.50	-8.06	0.709 136
2	地热水	2005	40.1	7.466	10.40	-8.50	0.709 168
3	地热水	230	64.3	8.776	28.90	-8.39	0.709 169
4	地热水	200	35.1	4.191	13.00	-7.48	0.709 208
5	地热水	307	64.7	10.488	31.20	-8.33	0.709 168
6	地热水	280	34.1	7.304	15.10	-8.18	0.709 210
7	地热水	230	65.3	10.478	28.60	-8.56	0.709 172
8	地下冷水	100	26.2	0.316	5.60	-7.38	0.709 514
9	汤水河水		18.5			-5.10	
10	地下冷水	10	18.2	0.403	6.56	-7.18	0.711 406
11	地下冷水	4	17.1	0.587	6.01	-7.16	0.712 065
12	汤水河水			0.359	9.58	-5.10	
13	地下冷水	5	16.5	0.365	8.11	-6.36	
14	地下冷水	4	15.3	0.457	7.82	-5.70	0.711 313
15	地下冷水	4	15.3	0.260	12.90	-7.08	
16	地下冷水	8	16.3	0.454	10.10	-6.92	
17	地下冷水	9	17.1	0.428	11.20	-6.77	0.711 853
18	地下冷水	11	17.3	0.143	5.72	-6.65	0.713 183
19	地下冷水	15	16.1	0.219	7.64	-6.66	0.711 447
20	地下冷水	5	15.1	0.779	9.50	-7.00	0.712 359
21	地下冷水	60	18.9	0.455	7.02	-7.50	0.712 682
22	地下冷水	6	15.9	0.558	8.84	-6.16	
23	地下冷水	10	16.1	6.921	6.32	-6.18	0.710 970
24	汤水河水				8.14	-5.01	
25	汤水河水				24.50	-5.14	
26	地下冷水	10	16.0	0.164	10.40	-5.61	0.711 076
27	池塘水				28.90	-3.84	
28	地下冷水	8	13.0	0.846	13.00	-5.16	0.709 563
29	地下冷水	5	13.0	0.205	6.54	-3.94	0.710 924
30	汤泉水库	19.5			6.54	-4.78	
Feb-30	汤泉水库					-4.75	
31	汤泉水库					-4.79	
Feb-31	汤泉水库					-4.65	
32	汤泉水库					-4.91	
Jan-32	汤泉水库					-4.74	
33	汤泉水库	19.5				-4.85	
34	汤泉水库					-4.55	
35	汤泉水库	19.5				-4.76	
36	汤泉水库	19.5				-4.58	
Jan-36	汤泉水库					-4.73	
37	汤泉水库					-4.65	
Jan-37	汤泉水库					-4.83	
38	汤泉水库	19.5				-4.89	
Jan-38	汤泉水库					-4.81	
39	汤泉水库					-4.69	
Jan-39	汤泉水库					-4.80	

续表 1

编号	水样类型	井深/ m	温度/ ℃	$\rho(\text{Sr})/$ ($\text{mg}\cdot$ L^{-1})	$\rho(\text{Si})/$ ($\text{mg}\cdot$ L^{-1})	$\delta^{18}\text{O}/$ ‰	$^{87}\text{Sr}/$ ^{86}Sr
40	汤水河水		20.4			-5.07	
41	汤水河水					-5.12	
42	汤水河水					-4.85	
43	汤水河水					-4.96	
44	汤水河水					-4.91	
45	地下冷水	5	15.4	0.739	8.87	-5.92	
46	地下冷水	10	16.4	0.472	9.34	-6.37	0.711561
47	地下冷水	200	20.4	0.272	5.15	-7.25	0.709721
48	地下冷水	8	14.7	0.696	6.76	-5.70	
49	地下冷水		19.1	0.806	5.18	-7.69	
50	地下冷水		19.1	0.27	4.46	-6.74	
51	地下冷水	30	14.4	0.464	7.42	-6.54	
52	地下冷水	6	15.8	0.755	8.89	-6.6	
53	地下冷水	10	16.5	0.723	15.30	-6.63	
54	地下冷水	5	14.1	0.357	6.86	-5.60	0.711866
55	地下冷水	11	15.1	0.393	11.10	-6.15	
56	地下冷水		16.3	0.561	10.50	-6.31	
57	地下冷水	4	14.1	0.265	12.10	-6.41	
58	地下冷水		17.1	0.320	4.03	-3.97	
59	地下冷水	5	16.1	0.332	7.53	-5.99	0.710640

利用全球降水同位素监测网(global network for isotopes in precipitation, GNIP)南京观测站(高程 26 m)的月降水同位素数据,得出研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 加权平均值为 -8.4‰ 。对比表 1 数据发现,地表水与地下冷水 $\delta^{18}\text{O}$ 均值分别为 -4.81‰ 和 -6.35‰ ,比大气降水偏正,表明受到蒸发作用的影响;地热水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为贫化,变化范围为 $-7.48\text{‰} \sim -8.56\text{‰}$,均值 -8.21‰ ,比地表水、地下冷水偏负 3.59‰ 、 2.05‰ ,表明地热水不是来自当地降水,而是来自高程较高、 $\delta^{18}\text{O}$ 值更负的外源水补给,并且与浅部地下冷水、地表水水力联系微弱。若地热水来自当地降水补给并由地下冷水转化而来,则地热水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值不可能低于 -6.35‰ ,因为水岩相互作用的结果将使地下水中的 ^{18}O 更加富集,海相碳酸盐岩是在海水条件下形成的,其中 ^{18}O 远比地下水富集^[8]。

1.2 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分析

由于 Sr 同位素不会发生分馏,而主要是受到 Sr 来源的控制^[9],水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 可以用来判定地下水是否来自于当地降水入渗。大气降水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值接近海水(0.709073),降水入渗岩层后,岩石中的 Sr 溶入水中,由于风化壳中 ^{87}Sr 可以来自于 ^{87}Ru 的衰变,沉积层的年代越久,衰变产生的 ^{87}Sr 浓度越高,所以地下水中 ^{87}Sr 的浓度逐渐增高^[10]。24 个采样点地下水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与井深关系见图 2, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值随深度的增加而降低,浅部地下冷水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布较广,变化范围 0.709514 ~ 0.713183,均值 0.7113025;深部热水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布集中,变化范围 0.709136 ~ 0.709

210,均值 0.709176,较浅部冷水值低。岩溶热水在上升过程中难免会与浅层冷水发生混合,已有研究表明热水与冷水混合比例为 27% ~ 63%^[2],说明纯热水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值更低。根据 Sr 同位素不分馏的特征,推断低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的热水不可能来自高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的冷水,而来源于具有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值特征的外源水。引起汤山地热水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值降低有两种可能:①混入了其他来源低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值水,如地幔岩浆水(0.705786);②入渗降水经过了低 ^{87}Sr 值岩层。地幔水的氧同位素偏离到全球雨水线的右边,与大气降水存在明显差异,第一种可能性被排除。新近纪期间,江苏、安徽一带曾发生两期玄武岩喷发,汤山位于火山活动的范围内,属于新生代火山玄武岩地下水的控制范畴,地下水在流经玄武岩过程中发生水岩反应, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值呈现为低值,表明地热水具有深循环地下水特征。

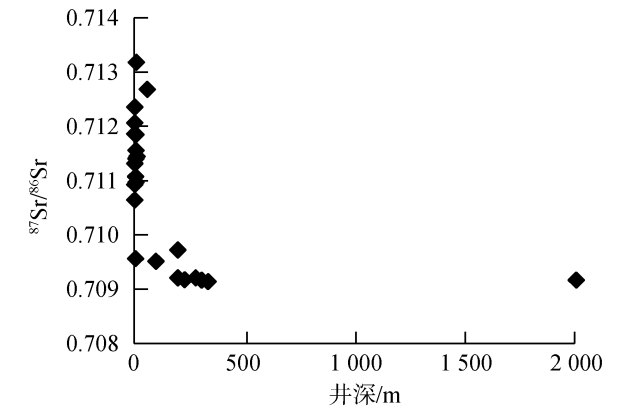


图 2 地下水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与井深关系

1.3 水化学分析

图 3 为地表水、地下冷水与地热水 Piper 三线图。由图 3 可见,地热水样点分布集中,阴离子以 SO_4 为主,阳离子以 Ca 为主,矿化度为 730 ~ 1780 mg/L,水化学类型主要为 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型,其中 R04 号样品可能受到冷水混合,水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。地下冷水与地表水样点分散,并且与地热水分布区域不同,地下冷水矿化度较低,为 193 ~ 819 mg/L,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}/\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型为主,少数样品为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型或 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;地表水矿化度最低,为 291 ~ 352 mg/L,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}/\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主。表明地热水与浅层冷水和地表水水力联系微弱,二者并未补给到热水中,否则三者样点应呈发散状落在相同区域。由地热水、地下冷水与地表水的 Na 标准图(图 4)可以看出,热水分布在右上方碳酸盐岩区,表明地热水中的低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值主要来自于碳酸盐。

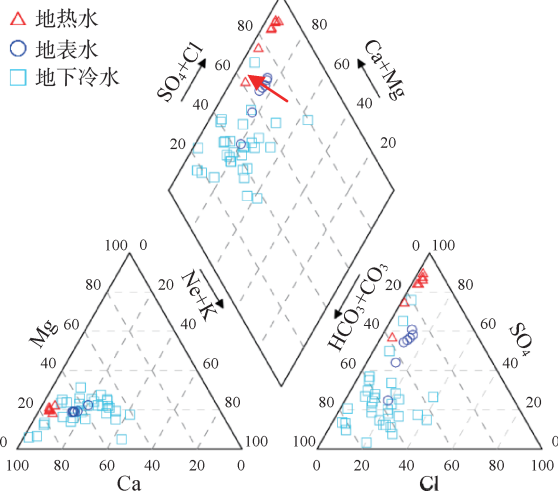


图3 地表水、地下冷水与地热水 Piper 三线图(单位:%)

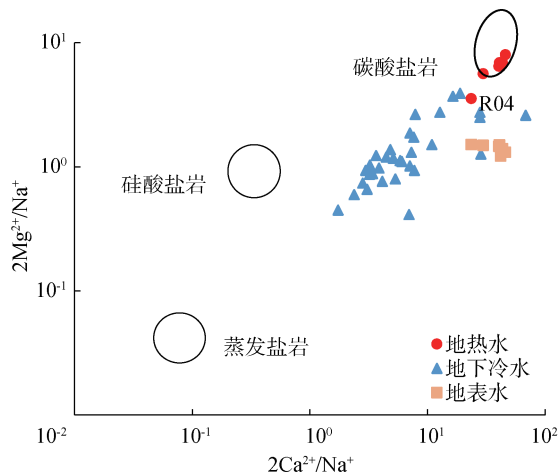


图4 地热水、地下冷水与地表水 Na 标准图

2 地热水来源分析

传统的区域水文地质循环理论认为,区域内的地下水都是接受当地降水的入渗补给:大气降水由汤山中部裸露的寒武系、奥陶系碳酸盐岩构造裂隙发育区入渗,沿汇水、导水的主干断裂下渗到 2.5 ~ 2.9 km 深度获取热量,并与深部围岩实现化学平衡,形成 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型热水,在汤山两端断裂处交汇,运移至浅部。而本次对汤山及周边不同水体的同位素及水化学分析发现,地热水中 $\delta^{18}\text{O}$ 比浅层冷水和地表水贫化,排除了热水来自当地降水入渗的可能。由于 Sr 同位素不发生分馏,地下水中的 Sr 主要来自于碳酸盐岩。如果热水是经过碳酸盐岩层被加热的,则 CaCO_3 中 $\delta^{18}\text{O}$ 与地下水中 $\delta^{16}\text{O}$ 将发生同位素分馏,氧同位素应逐渐富集。但实际上,热水中的氧同位素并未富集,表明热水并非被碳酸盐岩层加热。

南京市江宁区属宁芜火山构造洼地的一部分,广泛分布新生代玄武岩,而汤山正位于此处。新生代玄武岩中的熔岩隧道、孔洞与孔隙发育,90% 以上的孔洞、孔隙与微孔隙是相互连通的^[10-11],形成了

远距离、深循环输水通道。地热水中的 Si 浓度较高,具有新生代玄武岩地下水特征^[12],表明热水可能经过了孔洞玄武岩,并在此过程中被加热。地热水从玄武岩孔洞中涌出后进入了碳酸盐地层,由于玄武岩与碳酸盐都具有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的特征,所以汤山地热水呈现低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。而玄武岩矿物中的氧极难与水中的氧交换,因此热水中的氧同位素仍然保持贫化的特征。地热水经远距离深循环后在汤山两端沿碳酸盐岩脆性断裂破碎带上涌,形成与浅部冷水水化学特征存在明显差异并具可开发利用价值的地热资源,所以汤山温泉区仅为地热水的排泄区,其补径排示意图见图 5。

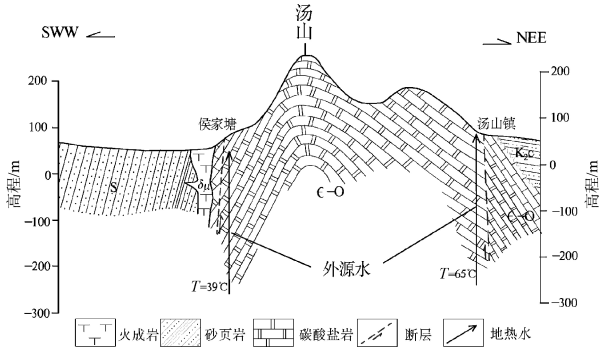


图5 汤山地热水补径排示意图

3 轨道交通工程对温泉的影响分析

宁句线城际轨道交通工程起于南京地铁 2 号线马群站,经麒麟、汤山至句容,线路全长 32.46 km,绕汤山体北部及东部沿 X426 设站 3 座,由西向东分别为侯家塘、汤泉西路、汤山镇站。除汤山西部古泉村内侯家塘站采用地上高架敷设方式外,其余两站均为地下二层岛式站(图 6)。

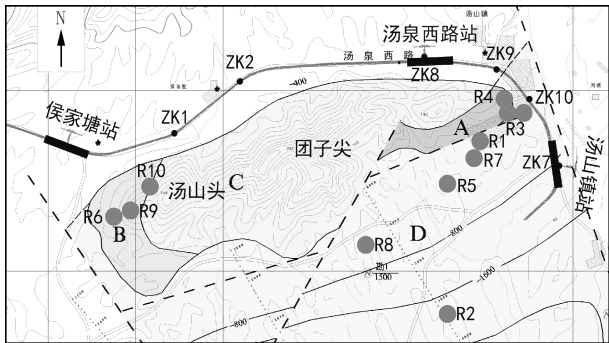


图6 宁句线汤山段线路走向及地热资源分区

注:A、B 区为岩溶热水区;C 区为岩溶冷水区;D 区为地热远景区。

汤泉西路站、汤山镇站基坑开挖设计深度 16 ~ 18 m,隧道占位高度 6 m 左右,考虑站点及隧道间坡度一般不大于 0.5%,则宁句线汤山段轨道交通工程埋深应不超过 30 m。根据地质勘探资料,工程沿线埋深 40 m 内,上部第四系厚度 5.8 ~ 12 m,下部为

志留系高家边组(S_1g)、白垩系浦口组(K_2p)砂页(泥)岩。工程区涉及的地下水类型主要为碎屑岩类裂隙水,赋存于志留系高家边组(S_1g)和白垩系浦口组(K_2p)微裂隙弱含水岩组中,水分运移缓慢,单井涌水量 $10\sim 50\text{ m}^3/\text{d}$;浅层松散岩类孔隙水,赋存于第四系亚黏土夹砾石中,厚度小于 10 m ,透水性差,单井涌水量一般 $3\sim 10\text{ m}^3/\text{d}$,水位埋深 $0.5\sim 3.0\text{ m}$ 。汤山山体由奥陶系(O)—寒武系中上统(ϵ_{2-3})灰岩、白云质灰岩、白云岩组成,裂隙及溶洞发育,中部块段岩溶裂隙水水温 $18\sim 25^\circ\text{C}$,东西两端为热水温泉区,水温 $35\sim 65^\circ\text{C}$,单井涌水量达 $1\,500\text{ m}^3/\text{d}$ 。

汤山地区地热资源没有规则的地热储层,热水存储在沟通深部热源的寒武系、奥陶系碳酸盐岩导水破碎带中。宁句线城际轨道交通位于汤山范围内,隧道和站点埋深不超过 30 m ,主要处在第四系松散层、志留系高家边组和白垩系上统砂页(泥)岩内,可判断无论施工期还是运营期,地铁穿越地热区对寒武系、奥陶系碳酸盐岩裂隙热储层不构成破坏。

前文分析确定,地热水是来自跨区域的外源水补给,与当地降水、地表水和浅层冷水无关。地热水来源远,循环深度大,汤山地热区只是地热水的排泄区。轨道交通工程空间占位低,处于志留系、白垩系砂页(泥)岩地层内,各地热井取水段上部均采用水泥固井止水,其施工和运营对地热水的补给、径流不存在直接影响。

4 结 论

a. 地热水、地下冷水和地表水的 ^{18}O 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 及水化学特征分析表明,汤山地热水与浅部冷水、地表水联系微弱,并非接受当地降水补给,而是来自具有同位素贫化特征的外源水,经新生代火山玄武岩深循环过程中加热,并在汤山两端沿断裂构造向地表排泄,成为温泉群。

b. 宁句线轨道交通工程埋深浅、占位低,其施工和运营对地热水的赋存、补给及径流条件没有直接影响。

致谢: 本文在写作过程中得到了河海大学陈建生教授的悉心指导,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 邹鹏飞,邱杨,王彩会. 南京汤山温泉区地热水成因模式分析[J]. 高校地质学报, 2015, 21 (1): 155-162. (ZOU Pengfei, QIU Yang, WANG Caihui. Analyses of the genesis of Tangshan hot spring area in Nanjing [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21 (1): 155-162. (in Chinese))

[2] 中国科学院地质与地球物理研究所. 江苏南京汤山地

区地热水补给来源研究报告[R]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2016.

[3] CHEN Jiansheng, LI Ling, WANG Jiyang, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 432 (7016): 459-460.

[4] 陈建生,江巧宁. 地下水深循环研究进展[J]. 水资源保护, 2015, 31 (6): 8-17. (CHEN Jiansheng, JIANG Qiaoning. Research progress of ground water deep circulation[J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6): 8-17. (in Chinese))

[5] 江巧宁,陈建生. 深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J]. 水资源保护, 2015, 31 (5): 7-13. (JIANG Qiaoning, CHEN Jiansheng. Analysis on water balance of deep cycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (5): 7-13. (in Chinese))

[6] 陈建生,王庆庆. 北方干旱区地下水补给源问题讨论[J]. 水资源保护, 2012, 28 (3): 1-8. (CHEN Jiansheng, WANG Qingqing. A discussion of groundwater recharge sources in arid areas of North China[J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (3): 1-8. (in Chinese))

[7] 邵家骥,黄姜依,杨忠元,等. 南京地区新生代玄武岩的期次、层序及时代[J]. 地质论评, 1989, 35 (2): 97-106. (SHAO Jiaji, HUANG Jiangnong, YAN Zongyun, et al. The division and age of basalts in the Nanjing area[J]. Geological Review, 1989, 35 (2): 97-106. (in Chinese))

[8] 董海洲,陈建生,陈亮. 水岩相互作用中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 漂移成因分析及应用[C]//中国地球物理学会第十九届年会论文集. 南京:中国地球物理学会, 2003.

[9] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. Chemical Geology, 1999, 161 (1/3): 59-88.

[10] 黄思静,刘树根,李国蓉,等. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31 (1): 1-7. (HUANG Sijing, LIU Shugen, LI Guorong, et al. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31 (1): 1-7. (in Chinese))

[11] 贾福海,秦志学,韩子夜. 对我国新生代玄武岩地下水的初步认识[J]. 中国地质, 1988 (3): 20-22. (JIA Fuhai, QIN Zhixue, HAN Ziye. A preliminary understanding of the groundwater of Cenozoic basalt in China [J]. Geology in China, 1988 (3): 20-22 (in Chinese))

[12] 韩子夜. 我国新生代玄武岩地下水资源及其开发利用[J]. 勘察科学技术, 1989 (3): 26-29. (HAN Ziye. Groundwater resource in Cenozoic basalt and its development and utilization [J]. Site Investigation Science and Technology, 1989 (3): 26-29. (in Chinese))

(收稿日期:2017-05-11 编辑:王 芳)