

刘凯, 刘颖超, 孙颖, 等. 北京地区地热水氘过量参数特征分析[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 2029–2035.

Liu Kai, Liu Yingchao, Sun Ying, et al. Characteristics of deuterium excess parameters of geothermal water in Beijing[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 2029–2035(in Chinese with English abstract).

北京地区地热水氘过量参数特征分析

刘 凯 刘颖超 孙 颖 刘久荣 王树芳 刘宗明

(北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘要: 文章通过 80 组不同地热田的样品, 分析总结了北京地区地热水资源氘过量参数的特征: (1) 地热水的平均 δ 值为 5.4, 常温地下水的平均 d 值为 6.04, 热水的 d 值与氘值都较低, 水岩作用所导致的氧同位素交换比冷水更容易进行; (2) 地下热水的氢和氧同位素组成具有明显的热交换趋势, d 值随地下水年龄增大而递增, 当地热水年龄为 (12.76 ± 0.13) ka 时, d 值为 11.2, 而当地热水年龄为 (38.96 ± 0.63) ka, d 值为 14.6; (3) 在同一地区, d 值随着地下水埋深加大而减小, 埋深为 125.13 m 时 d 值为 5.72, 埋深为 3221 m 时, d 值为 3.03; (4) 从补给源到排泄区, 地下水的 d 值应逐渐降低, 其中北部补给区平均 d 值为 7.31, 北京断陷盆地平均 d 值为 5.68, 南部凤河营地区仅为 -9.20; 补给源区与排泄区水的 d 的差值越大, 地下水的运动速度越慢; (5) 当 Eh 小于 200 mV 时, 北京地区地下热水的 d 值随着 Eh 值的降低而减少, 如在桐热-7 中, 氧化还原电位为 -326 mV, d 值为 -9.20, 而在 TR-43 中氧化还原电位为 158 mV, d 值为 7.48; 当 Eh 大于 200 mV 时, 地下热水的 d 值随着 Eh 值的降低而增加, 但增幅较小。

关键词: 氘过量参数; 地热水; 氧同位素; 氢同位素; 氧化还原电位

中图分类号: P597; P314.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)06-2029-08

Characteristics of deuterium excess parameters of geothermal water in Beijing

LIU Kai, LIU Ying-chao, SUN Ying, LIU Jiu-rong, Wang Shu-fang, LIU Zong-ming

(Beijing Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100195, China)

Abstract: Eighty water samples were collected from different geothermal fields in Beijing and the following five kinds of characteristics of deuterium excess parameters were analyzed: (1) The average d value of geothermal water is 5.40, the average d value of cold groundwater is 6.04, which is bigger than that of the geothermal water, so the oxygen isotope exchange caused by water-rock interaction is easier in geothermal water than in cold groundwater. (2) The oxygen isotope has remarkable isotope exchange process, and the d value increases with the age of the geothermal groundwater. When the age of the water is (12.76 ± 0.13) ka, the d value is 11.2; when the age of the water is (38.96 ± 0.63) ka, the d value is 14.6. (3) The d value decreases with the depth of the geothermal groundwater in the same area; when the depth is 3221 m, the d value is 3.03; when the depth is 125.13 m, the d value is 5.72. (4) The d value decreases from the recharge area to the discharge area. The average d value is 7.31 in northern recharge area, 5.68 in Beijing depression, and -9.20 at the southern edge of Beijing plain. The velocity of flow decreases with the difference d

收稿日期: 2014-10-22; 改回日期: 2014-12-12

基金项目: 中国地质调查局项目“全国地热资源调查评价-北京市地热资源现状调查评价与区划”(水[2013]01-029-006)资助。

作者简介: 刘凯, 男, 1983 年生, 工程师, 硕士生, 主要从事水工环及地热等相关工作; E-mail: liukai@bjswd.com。

values. (5) The d value increases with the redox potential when it is smaller than 200 mV. When the redox potential is -326 mV, the d value is -9.20 ; when the redox potential is 158 mV, the d value is 7.48 . The d value decreases with the redox potential when it is bigger than 200 mV.

Key words: deuterium excess parameter; geothermal water; oxygen isotope; hydrogen isotope; Redox potential

About the first author: LIU Kai, male, born in 1983, master, engineer, mainly engages in the work of hydrogeology, environmental geology and the study of geotherm; E-mail: liukai@bjswd.com.

氘过量参数(d)也称为氘盈余,是 Dansgaard 于 1984 年提出的一个概念,并且把它定义为 $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ ^[1]。因此,任何地区的大气降水都可以算出一个氘过量参数 d , d 值的大小相当于该地区的降水线斜率 $\Delta\delta D / \Delta\delta^{18}O$ 为 8 时的截距,可以反映出该地区大气降水与全球大气降水的氢、氧同位素分馏程度,是区域水岩氧同位素交换程度的总体反映。任何一个地区,一旦当地大气降水线被准确确定,根据 d 值定义,大气降水氘过量参数 d 值也随之而定,并且在同一计算区域内, d 值不受季节、高度和其他因素的影响,理论上维持恒定值不变。根据 d 过量参数的定义,当 δD 值不变, $\delta^{18}O$ 值升高, d 值就变小。地下水中氧同位素升高的程度,取决于岩石的含氧化合物的化学组分、含水层的温度和地下水在含水层内滞留时间的长短。同一地区,同一含水层内,地下水 $\delta^{18}O$ 与滞留时间关系密切,滞留时间越长, $\delta^{18}O$ 值越高^[2-3]。

国内许多学者针对地热资源、温泉、地热水化学特征、地热资源稳定同位素特征、地热资源分布特征的影响及控制因素进行了大量的研究^[4-16],此外刘存富、顾慰祖、尹观等针对氘过量参数开展了许多研究和应用^[17-25]。国外许多学者对氘过量参数也进行过大量的研究^[26-32]。虽然国内外学者已开展大量研究,但北京地区地热资源的氘过量参数分析尚未进行,本文针对这点展开研究,其中 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素测试数据由中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室测试获取,其他同位素数据由中国地质科学院矿产资源研究所测试中心测试完成。

1 北京地区地热水资源概况

北京地热资源主要分布于北京平原地区(含延庆盆地),属盆地传导型中低温地热资源,主要热储

为蓟县系雾迷山组硅质白云岩及寒武—奥陶系灰岩、古近系和新近系的泥岩和砂岩;主要盖层为白垩系和侏罗系安山岩、凝灰岩和玄武岩,石炭系和二叠系页岩、粉砂岩及细砂岩,青白口系下马岭组和蓟县系洪水庄组页岩。北京地热资源温度范围为 $25.0 \sim 118.5$ °C。地热水多为矿化度在 $500 \sim 700$ mg/L 的重碳酸—硫酸钠型水,氟、偏硅酸含量较高,多数为氟、偏硅酸医疗热矿水,还含有一定量的其他微量元素,有一定医疗、保健、养生作用。

经勘查,北京平原地区,深度 3500 m 内、井出水温度大于 50 °C 的地区面积约 2760 km²,构成相对独立又有一定联系的 10 个地热田,分别为延庆地热田、小汤山地热田、后沙峪地热田、西北城区地热田、天竺地热田、李遂地热田、东南城区地热田、双桥地热田、良乡地热田和风河营地地热田(图 1)^①。

本次取样及收集样品共 80 组,主要分布在 10 个地热田中,其中地热水样品 70 组、大气降水 1 组、第四系水样 9 组。地热取样井深 $500.1 \sim 3779.0$ m,平均井深 1946.4 m,样品出水温度 $28.0 \sim 79.0$ °C,取样热储主要为蓟县系雾迷山组、蓟县系铁岭组、寒武系及奥陶系。

2 北京地区地热水氘过量参数特征分析

2.1 北京地区地热水 d 值基本概况

20 世纪 80 年代郑淑惠、张理刚和刘东生等通过对我国大陆许多地区的大气降水的氢、氧稳定同位素的统计分析,建立了我国的大气降水线,而李娟等对北京地区大气降水方程进行了研究^[33]。根据 80 组样品测试结果,北京地区地热水中的 $\delta^{18}O$ 值分布于 $-12.14\text{‰} \sim -7.10\text{‰}$, δD 值介于 $-86.5\text{‰} \sim -61.7\text{‰}$; 第四系地下水的 $\delta^{18}O$ 值介于 $-10.34\text{‰} \sim -7.80\text{‰}$, δD 值介于 $-77.3 \sim -49.1\text{‰}$; 本次所取大气降水的 δD 值

①北京市国土资源局.北京市地热资源 2006—2020 年可持续利用规划. 2006.

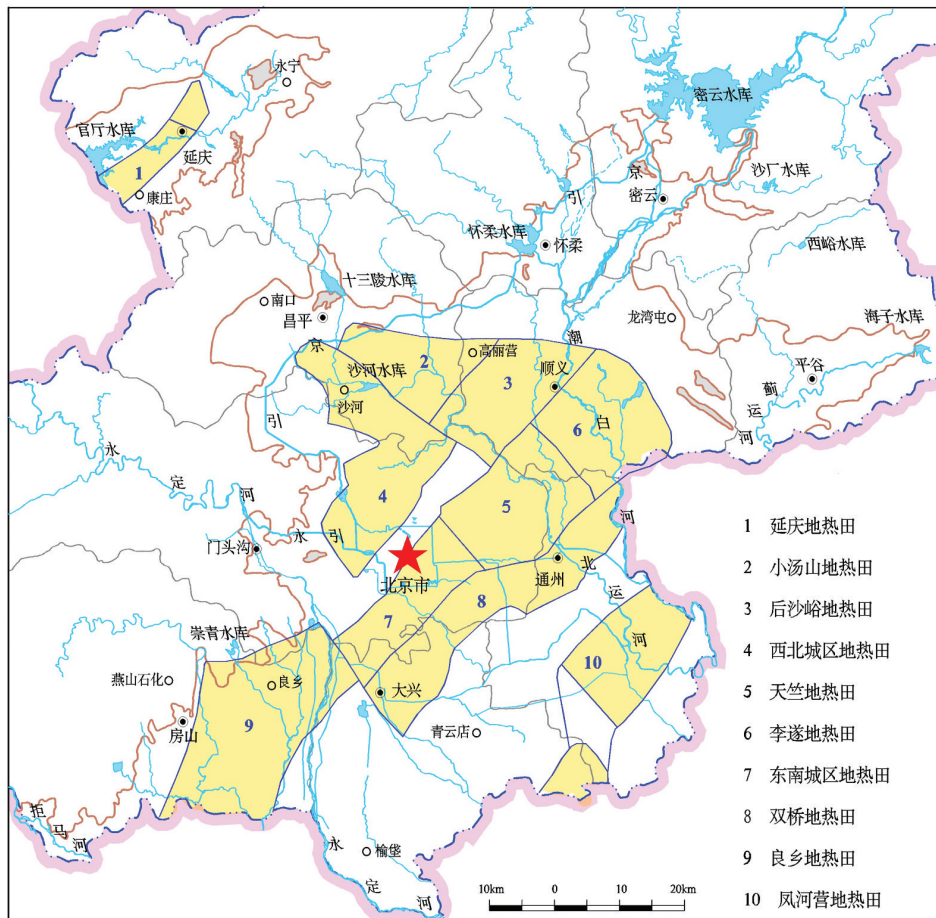


图1 北京地区地热田划分示意图

Fig.1 Schematic map showing geothermal field divisions

为 -7.82‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -58.9‰ (图2)。北京地区地下热水、第四系地下水、大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素数据基本上都落在北京大气降水线附近,即北京地区地热水是大气起源,只是因降水补给的高程、径流途径不同而稍有差异^[34]。

北京地区地热水的 d 值介于 $-9.20\sim 18.20$,主要集中于 $5\sim 10$,均值为 5.40 ;第四系常温地下水 d 值介于 $-4.4\sim 23.2$,均值为 6.04 (表1)。根据 d 值定义,地热水 d 值相对较低,其水岩作用导致的氧同位素交换趋势及交换程度相对冷水更加明显。

大气降水入渗补给到地下含水层后,由于水岩作用,水体与含氧岩石发生同位素交换,导致地下水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 升高, d 值减小,而地下水在含水层内滞留时间的长短对其氧同位素组成升高的程度有一定的影响,同一地区,同一含水层内,地下水滞留时

间越长,水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值越高,从而影响到 d 值的变化,地下水的 d 值与水的滞留时间存在直接相关性。

北京地区地热水气同位素的值介于 $0.25\sim 10.65$ TU,均值为 3.54 TU;第四系常温地下水的氡值介于 $4.13\sim 24.46$ TU,均值为 15.15 TU(表2),地热水的氡同位素值明显低于第四系地下水。此外,北京地区高氡的地热水主要位于小汤山地热田北部(R02、R04、R05),这也显示出该地区有明显冷水补给的趋势,与小汤山57年历史水质动态变化分析结果一致^①。

2.2 地热水 d 值与地热水年龄

根据地热水 ^{14}C 同位素测试结果,北京地区地热水 ^{14}C 年龄介于 $19.40\sim 38.96$ ka。北京地区第四系地下水的年龄根据取样深度不同介于 $0.94\sim 27.39$ ka,其中大多数介于 $0.94\sim 9.16$ ka。整体而言地热水年龄稍高于第四系浅层水,对于基岩裂隙水,地热水

①刘凯,孙颖,刘久荣,等.北京市地热资源现状调查评价与区划.2014.

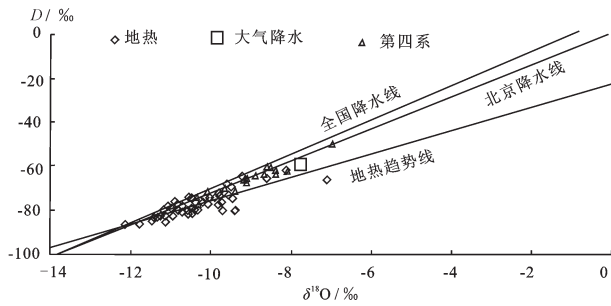


图2 北京地区地下热水δD-δ¹⁸O关系图
Fig.2 Scatterplot of δD-δ¹⁸O in geothermal water, Beijing

表1 部分地热水d值一览

Table 1 List of d values in part of the geothermal water samples

编号	δD / ‰	δ ¹⁸ O / ‰	d	编号	δD / ‰	δ ¹⁸ O / ‰	d
RS001	-79.08	-10.76	7.04	RS008	-72.59	-9.79	5.72
RS002	-83.32	-11.38	7.72	RS009	-86.45	-12.14	10.69
RS003	-77.00	-10.30	5.38	RS010	-64.00	-10.90	23.20
RS004	-76.61	-10.21	5.10	RS011	-73.00	-11.50	19.00
RS005	-79.78	-10.35	3.03	RS012	-65.00	-10.30	17.40
RS006	-76.42	-9.76	1.65	RS013	-62.00	-7.20	-4.40
RS007	-74.29	-10.17	7.09	RS014	-66.00	-7.10	-9.20

表2 部分样品氚值一览

Table 2 List of tritium values in part of the geothermal water samples

编号	氚 / TU	编号	氚 / TU
R01	1.19	R09	1.42
R02	10.65	R10	2.63
R03	1.51	R11	4.13
R04	6.28	R12	17.92
R05	4.87	R13	9.75
R06	1.79	R14	12.07
R07	1.42	R15	19.07
R08	6.75	R16	15.91

年龄与其相仿但与其d值相比相对较低。由此可见北京地区地热水资源流动速度十分缓慢,地热水的相对滞留时间相对较长。图3中,d值随着地热水年龄的增加逐渐增大,呈现比较明显的正相关趋势,当地热水年龄为(12.76±0.13) ka时,d值为11.2,而当地热水年龄为(38.96±0.63) ka,d值为14.6。在地热水样品中,凤河营地热水年龄为(33.30±0.57) ka,其d值仅为-9.2,这也体现出凤河营地热田与北京

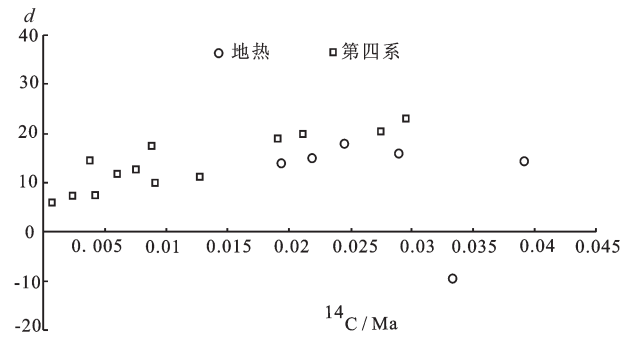


图3 地热水年龄与d值关系曲线
Fig.3 The relationship between d value and geothermal water age

地区其他地热田相比具有相对独立性。

2.3 地热水d值垂向分布特征

本文以小汤山地热田为例,选取大气降水、第四系地下水、蓟县系雾迷山组及铁岭组热储地热水,绘制北京地区地热水资源d值垂向分布特征曲线(图4)。从图中可以看出,同一深度上,不同热储地热水d值略有不同,蓟县系雾迷山组地热水d值低于铁岭组地热水。同一地区,不同类型地下水d值均随深度增大而减小。如蓟县系雾迷山组地热水埋深为125.13 m时,d值为5.72,埋深为3221 m时,d值为3.03。地热水d值的垂向变化分布特征与地热井温度的垂向变化特征相反(图5),具体体现为d值随深度增大而降低,出水温度随深度增加逐渐升高,其水岩作用所导致的氧同位素交换更容易进行,交换程度也越高,d值也越小。

2.4 地热水d值平面分布特征

北京地区地热水d值平面上体现为自西北向东南逐渐降低的趋势,其中北部补给区平均d值为7.31,北京断陷盆地平均d值为5.68,南部凤河营地区仅为-9.20。这也反映出源于大气降水的同一热储中,从补给源到排泄区,地热水d值逐渐降低,补给源与排泄区d值的差值越大,反映地热水的运动速度越慢,d值的差值越小,则流速越快;即北京断陷盆地内地热水流速相对较大,而位于北京地区东南部凤河营地热田的地热水流速相对较慢,滞留时间相对较长,氧同位素交换趋势和交换程度相对明显,d值相对较低。

根据d值的平面分布特征,天竺地热田中JR-169及JR-105的d值分别为-2.53、-5.06,形成一个相对d值较低区域,与周边李遂地热田、东南城区地

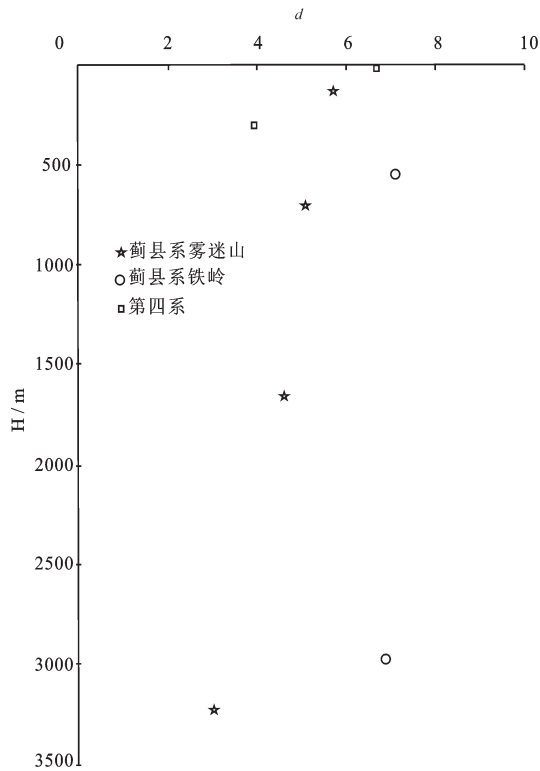


图4 地热水 d 值垂向分布

Fig.4 Vertical distribution of geothermal water d values

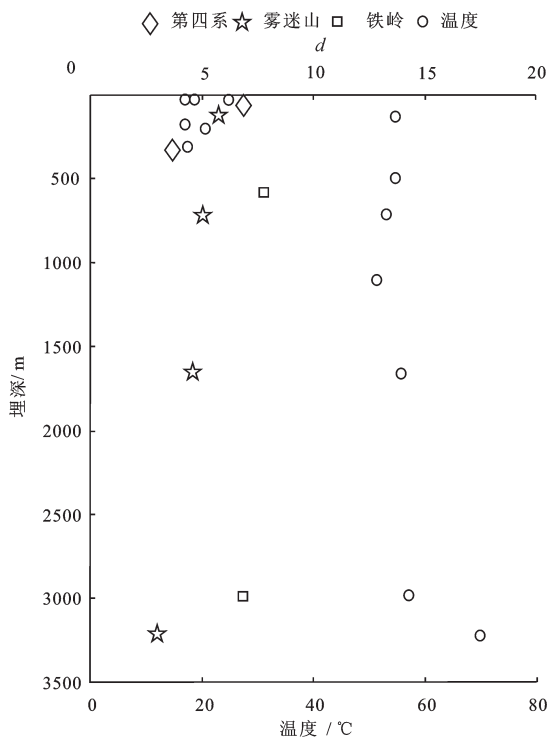


图5 地热水 d 值与出水温度

Fig.5 Scatterplot of geothermal water d values and water temperatures

热田及双桥地热田有明显差异,这也为北京地区地热资源研究提供了同位素证据。

2.5 地热水 d 值与 Eh 值

氧化还原电位是用来体现水溶液宏观氧化-还原性参数的指标。氧化还原电位越高,氧化性越强,电位越低,氧化性越弱。电位为正表示溶液显示出一定的氧化性,为负则说明溶液显示出还原性。从图6中可以看出,当 Eh 值小于 200 mV 时,其相关关系为 $d=0.0307Eh+0.944$, $R^2=0.94$, 地下水 d 值随 Eh 值的降低而降低;当 Eh 值大于 200 mV 时,地热水 d 值随 Eh 的减小而增大,但其整体变化范围较小。当 Eh 值小于 200 mV 时,如 TongR-7 中,氧化还原电位为 -326 mV, d 值为 -9.20, 而在 TR-43 中氧化还原电位为 158 mV, d 值为 7.48; 当 Eh 值大于 200 mV 时,如 Q-2 中,氧化还原电位为 693 mV, d 值为 7.56, 而在 HR-5 中,氧化还原电位为 486 mV, d 值为 9.12。其中风河营地热田和天竺地热田的氧化还原电位相对较低,其 d 值相对较低,分析其沉积环境相对独立,与其他地热田有较明显区别,这为地热田地热资源特征分析提供了新的参数指标。此外,当常规水样分析时,根据其容易获取的氧化还原电位推测其 δ 值,推测其沉积环境及沉积特征,尤其为北京地区地热田非构造控制边界的划分提供了参考证据。

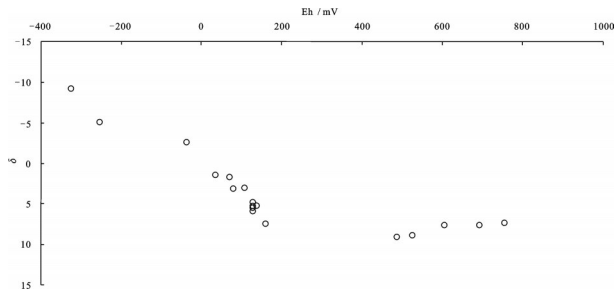
根据 d 值定义,由于水与岩石圈之间的同位素交换, $\delta^{18}O$ 值升高, δD 值几乎不产生影响, d 值就变小。地热水在热储中滞留时间越长,径流速度越慢,其水岩相互作用越明显, d 值越小。根据北京地区 d 值变化特征分析北京地区地热资源的储存时间、径流速度、热储温度、氧化还原电位等特征,这为北京地区地热资源分析提供了一种新的重要参数指标。

3 结 论

(1)北京地区地热水 d 值介于 -9.2~18.2, 均值为 5.4, 第四系常温地下水 d 值介于 -4.4~23.2, 均值为 6.04, 地热水的 d 值与氡值都较低,水岩作用所导致的氧同位素交换趋势及交换程度比第四系地下水更容易进行。

(2)北京地区地热水 ^{14}C 年龄介于 19.40~38.96 ka, 地热水资源流动速度十分缓慢,地热水的滞留时间相对较长。

(3)垂向上,北京地区不同热储地热水 d 值随深

图6 地热水 d 值与Eh关系示意图Fig.6 Relationship between d value and Eh

度增大而减小。 d 值的垂向变化分布特征与地热井温度的垂向变化特征相反,随深度增加,温度增大,其水岩作用所导致的氧同位素交换更容易进行,交换程度也越高, d 值减小。

(4)平面上,北京地区地热水 d 值呈现为自西北向东南逐渐降低的趋势,这也反映出同一热储中,从补给源到排泄区,地热水 d 值逐渐降低,即北京断陷盆地内地热水流速相对较大,而位于北京地区东南部凤河营地热田的地热水流速相对较慢,滞留时间相对较长,氧同位素交换趋势和交换程度相对明显, d 值相对较低。

(5)当Eh值小于200 mV时,地下热水 d 值随Eh值的降低而降低;当Eh值大于200 mV时,地热水 d 值随Eh的减小而增大,但其整体变化范围较小。

(6)地热水 d 值的研究为北京地区地热资源研究提供了一种新的参数指标。

致谢: 本单位的刘殷、张院、路明、李鹏、王新娟等同事为采取和分析地热水样付出了艰辛的劳动,审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1984, 16(4): 436–468.
- [2] 尹观,倪师军,张其春. 氘过量参数及其水文地质学意义[J]. 成都理工大学学报, 2001, 7(3): 251–254.
Yin Guan, Ni Shijun, Zhang Qichun. Deuterium excess parameter and geohydrology significance—Taking the geohydrology researches in Jiuzhaigou and Yele, Sichuan for example[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 7(3): 251–254(in Chinese with English abstract).
- [3] 尹观,倪师军. 地下水氘过量参数的演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 409–411.
Yin Guan, Ni Shijun. Deuterium excess parameter evolution in ground water[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 409–411(in Chinese with English

abstract).

- [4] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312–321.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312–321(in Chinese with English abstract).
- [5] 汪洋. 应用大地热流和地下流体氦同位素组成资料计算中国大陆地壳生热元素丰度[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 920–927.
Wang Yang. Radioactive heat-producing element abundance in the crust of continental China estimated from terrestrial heat flow and the helium isotopic composition of underground fluids[J]. *Geology in China*, 2006, 33(4): 920–927(in Chinese with English abstract).
- [6] 匡耀求,黄宁生,朱照宇,等. 试论大地热流对地表环境与生态演变的影响[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 86–95.
Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng, Zhu Zhaoyu, et al. Influence of the terrestrial heat flow on the evolution of the surface ecosystem and environment[J]. *Geology in China*, 2002, 29(1): 86–95 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘振锋,王继明,吕金波,等. 河北省赤城县温泉环斑花岗岩的地质特征及形成时代[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1052–1058.
Liu Zhenfeng, Wang Jiming, Lv Jinbo, et al. Geological features and age of the Wenquan rapakivi granite, Chicheng County, Hebei[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 1052–1058(in Chinese with English abstract).
- [8] 王卫星,李攻科,李宏,等. 河北汤泉地热流体水文地球化学特征及其成因[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1935–1941(in Chinese with English abstract).
Wang Weixing, Li Gongke, Li Hong, et al. Hydrogeochemical characteristics and origin of the geothermal fluid in Tangquan area, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1935–1941(in Chinese with English abstract).
- [9] 尚宇宁,高明志,吴立进,等. 济南北部地热资源区划研究[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 778–783.
Shang Yuning, Gao Mingzhi, Wu Lijin, et al. Division of geothermal resources in northern Jinan[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 778–783(in Chinese with English abstract).
- [10] 石维栋,张森琦,周金元,等. 西宁盆地北西缘地下水分布特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1131–1136.
Shi Weidong, Zhang Senqi, Zhou Jinyuan, et al. Distribution characteristics of geothermal water on the northwestern margin of the Xining basin[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 1131–1136 (in Chinese with English abstract).
- [11] 颜世强,潘懋,邹祖光,等. 山东德州凹陷地下水地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 149–152.
Yan Shiqiang, Pan Mao, Zou Zuguang, et al. Geochemical characteristics and origin of geothermal water in the Dezhou hollow[J]. *Geology in China*, 2007, 34(1): 149–152(in Chinese with English abstract).
- [12] 王奎峰. 山东省聊城市东部地热田地热资源特征[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 194–202.
Wang Kuifeng. Geothermal resources in the eastern Liaocheng geothermal field of Shandong Province[J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 194–202(in Chinese with English abstract).
- [13] 栾英波,郑桂森,卫万顺. 北京平原区粉质粘土热导率影响因素实验研究[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 981–988.
Luan Yingbo, Zheng Guisen, Wei Wanshun. The experimental

- study of the factors affecting the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing plain[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 981–988(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘景东, 蒋有录. 东濮凹陷北部地区古近系烃源岩热演化特征及其主控因素[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 498–507. Liu Jingdong, Jiang Youlu. Thermal evolution characteristics of Paleogene source rocks and their main controlling factors in northern part of Dongpu depression[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 498–507(in Chinese with English abstract).
- [15] 张保建, 文冬光, 沈照理, 等. 一种值得重视的地热资源概念模式—构造圈闭型地热资源[J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 927–931. Zhang Baojian, Wen Dongguang, Shen Zhaoli, et al. An important geothermal resource conceptual model—Geothermal resource of structural trap-type[J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 927–931(in Chinese with English abstract).
- [16] 牛树银, 孙爱群, 马宝军, 等. 华北东部地幔热柱的特征与演化[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 931–942. Niu Shuyin, Sun Aiqun, Ma Baojun, et al. Characteristics and evolution of the mantle plume in eastern North China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 931–942(in Chinese with English abstract).
- [17] 刘存富, 王恒纯. 环境同位素水地质学基础(选修课教材)[M]. 武汉: 武汉地质学院水文地质教研室, 1984. Liu Cunfu, Wang Hengchun. Environmental Isotope Hydrogeology[M]. Wuhan: Wuhan Institute of Geological Hydrogeological Teaching and Research Section, 1984 (in Chinese).
- [18] Mebus A G, 顾慰祖, 刘涌, 等. 阿拉善高原地下水的稳定同位素异常[J]. *水科学进展*, 1998, 9(4): 333–337. Mebus A G, Gu Weizu, Liu Yong, et al. Isotopically anomalous groundwater of Alxa Plateau, Inner Mongolia[J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(4): 333–337(in Chinese with English abstract).
- [19] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. Gu Weizu, Pang Zhonghe, Wang Quanjiu, et al. Isotope Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨波, 尹观. 水体同位素组成及氘过量参数在地热勘探中的示踪作用——以四川绵竹三箭水温泉开发为例. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(2): 129–133. Yang Bo, Yin Guan. Isotope composition and deuterium excess parameter of water bodies as tracers in exploration of geothermal water—A case study on exploration of geothermal water in Sanjianshui, Sichuan[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(2): 129–133(in Chinese with English abstract).
- [21] 王茜, 尹观, 范晓, 等. 四川牟尼沟珍珠泉和翡翠泉的同位素组成及氘过量参数研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 402–405. Wang Qian, Yin Guan, Fan Xiao, et al. Study of the isotope compositions and deuterium excess parameter in the Zhenzhu Spring and Feicui Spring, Munigou, Sichuan[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 402–405 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李智, 尹观, 蒋良文. 圆梁山隧道毛坝向斜段岩溶水的同位素组成及氘过量参数示踪研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 188–192. Li Zhi, Yin Guan, Jiang Liangwen. Study on deuterium excess parameter tracer and isotope composition of the karst water in the Maoba syncline of the Yuanliangshan Tunnel[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 188–192 (in Chinese with English abstract).
- [23] Huang Tianming, Pang Zhonghe. The role of deuterium excess in determining the water salinisation mechanism: A case study of the arid Tarim River Basin, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27: 2382–2388.
- [24] Dong Weihong, Kang Bo, Du Shanghai, et al. Estimation of shallow groundwater ages and circulation rates in the Henan Plain, China: CFC and deuterium excess methods[J]. *Geosciences Journal*, 2013, 7(4): 479–488.
- [25] Yan Qiushi, Gao Zhiyou, Ni Shijun, et al. Evolution of isotopic composition and deuterium excess of brines in the Sichuan Basin, China[J]. *Chin. J. Geochem*, 2013, 32: 69–77.
- [26] Schotterer U, Froehlich K, Stichle W, et al. Temporal variation of (super18) O and deuterium excess in precipitation, river and spring waters in Alpine region of Switzerland [J]. *Vienna: Proceedings Series—International Atomic Energy Agency*, 1993, 53–54.
- [27] White J, Johrsen S J, Dansgaard W. The origin of Arctic precipitation as deduced from its deuterium excess[J]. *Annals of Glaciology*, 1988, 10: 219–220.
- [28] Petit J R, White J W C, Young N W, et al. Deuterium excess in recent Antarctic snow [J]. *J Geophys. Res., D, Atmospheres*, 1996, 3: 5113–5122.
- [29] Sanghyun Kim, Sungwon Jung. Estimation of mean water transit time on a steep hillslope in South Korea using soil moisture measurements and deuterium excess[J]. *Hydrol. Process*, 2014, 28(4): 1844–1857.
- [30] Duprat J, Dobrică E, Engrand C, et al. Extreme deuterium excesses in ultracarbonaceous micrometeorites from central Antarctic snow[J]. *Science*, 2010, 328(5979): 742–5.
- [31] Klaus Froehlich, Martin Kralik, Wolfgang Papesch, et al. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions—moisture recycling[J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2008, 44(1): 61–70.
- [32] Michael Zech, Mario Tuthorn, Florian Detschet al. A 220 ka terrestrial $\delta^{18}\text{O}$ and deuterium excess biomarker record from an eolian permafrost paleosol sequence, NE–Siberia[J]. *Chemical Geology*, 2013, 360–361: 220–230.
- [33] 李娟. 地下热水中 D、 ^{18}O 、 ^{34}S 和 ^{13}C 稳定同位素特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008. Li Juan. A Study of the Stable Isotopes of Deuterium, Oxygen–18, Sulfide–34 and Carbon–13 in Thermal Groundwater[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008(in Chinese with English abstract).
- [34] 刘凯, 张院, 孙颖, 等. 环境同位素在北京市地热资源研究中的应用[J]. *城市地质*, 2014, 9(S1): 79–84. Liu Kai, Zhang Yuan, Sun Ying, et al. Application of Environment Isotopic on Studying Beijing Geothermal[J]. *Urban Geology*, 2014, 9(Supp.): 79–84 (in Chinese with English abstract).

2014年度地质及地球科学类期刊前30名影响因子排序表

1	岩石学报	1.820	16	地球科学	1.036
2	石油实验地质	1.733	17	地球科学与环境学报	0.972
3	地学前缘	1.721	18	地质通报	0.961
4	中国地质	1.634	19	沉积学报	0.910
5	地球学报	1.596	20	地球化学	0.838
6	第四纪研究	1.494	21	现代地质	0.828
7	矿床地质	1.460	22	成都理工大学学报(自然科学版)	0.816
8	地质学报	1.435	23	地质与勘探	0.799
9	地球科学进展	1.432	24	水文地质工程地质	0.783
10	中国科学 地球科学	1.421	25	自然灾害学报	0.769
11	大地构造与成矿学	1.329	26	地质科技情报	0.696
12	古地理学报	1.182	27	岩石矿物学杂志	0.695
13	地质论评	1.155	28	矿物岩石地球化学通报	0.695
14	吉林大学学报(地球科学版)	1.152	29	西北地质	0.672
15	岩矿测试	1.064	30	地球信息科学学报	0.642

注:表中数据引自中国科学技术信息研究所编《2015年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,北京:科学技术文献出版社。