

镜泊湖地区水体的同位素、元素地球化学特征 及地下热水储存状态分析

尚英男, 徐旂章, 尹 观

成都理工大学, 成都 610059

摘 要: 依据镜泊湖地区水体的同位素、水化学及微量元素中子活化分析资料, 详细阐述了各采样点水体的来源、补给相对高程和它们之间可能的水力联系, 以及有关的地热信息; 分析了区内地热资源的有利地质背景条件研究区地处深大断裂及岩浆喷发带, 火山喷发一直延续至第四纪全新世, 有充分的热源供给; 区内上部为较厚的玄武岩覆盖, 有利于储存地热; 下部白垩系上统为主要含水层, 发现有广泛分布的典型水/岩热蚀变产物——斜发沸石, 进而证明存在地下热水的可能性。

关 键 词: 镜泊湖; 同位素组成; 元素地球化学; 地下热水

中图分类号: P592 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2003)01-0056-05

1 区域地质概况

镜泊湖位于黑龙江省东南端, 地理位置为北纬 $44^{\circ}5' \sim 43^{\circ}40'$ 和东经 $128^{\circ}30' \sim 129^{\circ}30'$ 。地处牡丹江上游段水域, 牡丹江河水在吊水楼一带流经第四系玄武岩台地时受阻, 形成一天然湖泊。

镜泊湖地区地处老爷岭地块边缘隆起带的南段敦(化)密(山)岩石圈断裂带, 属郯庐深大断裂带北东部分。断裂带由两条高角度相对逆冲的主干断裂组成, 构成了“逆地堑式”构造, 地貌上表现为开阔的谷地, 北东段与穆林河谷分布基本一致, 南西段则与牡丹江南折的镜泊湖谷地水域同步。

区内构造以断裂为主, 有北东向、北北东向、南北向、近东西向和北西向, 其中北东向及其次级断裂多属敦密断裂的低级次断裂, 但后期多受北北东向、北西向、南北向和东西向断裂破坏, 构成基本的构造格局。

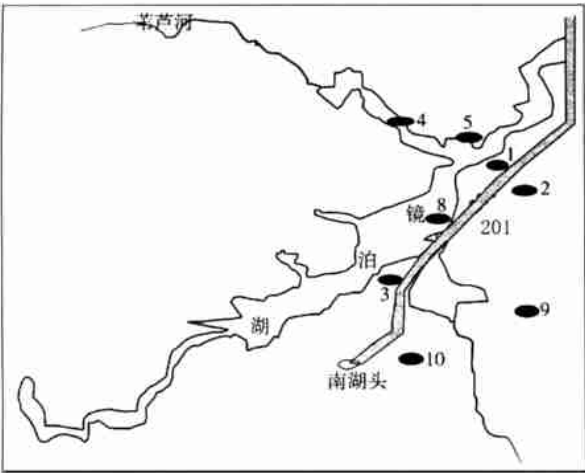
区内为中生代印支期以来的火山岩浆所覆盖, 各期岩浆活动几乎占 97% 以上。在同一地质时期内, 它们分别形成于不同的构造环境, 决定着它们的

有序演化和侵入、喷发, 呈现不同的岩浆系列。侵入岩属碱性花岗岩系列, 时空上总体从远敦密断裂到靠近该断裂, 从印支期至燕山中期, 有碱性 $\rightarrow$ 碱长性花岗岩的演化趋势。花岗岩形成时的大地构造环境属滨太平洋大陆边缘活动带, 构造运动以断块为主, 常与同源火山活动相伴, 喷发-侵入活动频繁。

燕山中期是中生代火山活动的主体, 表现为白垩纪火山活动频繁, 火山熔岩、火山碎屑岩和凝灰岩非常发育。喜马拉雅期火山活动明显受第三纪以来太平洋板块俯冲运动控制, 火山活动受地幔底辟和敦密深大断裂制约, 早期以中心式喷发为主, 中期以裂隙式宁静溢流为主, 形成了熔岩流、熔岩台地, 间夹弱爆发和喷溢, 形成火山锥; 晚期爆溢相间, 活动频繁但微弱; 最后为强烈气浆爆发, 表现于火山的特征。

2 各种水体的同位素组成及常量元素地球化学分布特征

我们分别在一些泉眼、湖、井采集了 10 件水样(图 1), 全部作了水的氢、氧同位素, 氟含量及水化学分析, 结果列于表 1、2。



采样点位置: 1. 卢家大沟; 2. 大泉眼; 3. 农田边上泉水; 4. 吊水楼瀑布上游; 5. 吊水楼瀑布下深潭水; 8. 小苇子沟; 9. 镜泊乡金明水; 10. 镜泊乡热水井

图 1 镜泊湖地区各采样点示意图

Fig. 1 The sketch map of sampling location in Jingbohu

2. 1 同位素分析方法及测定精度

样品制备: 氢用金属铷法, 在 600~ 700 °C真空条件下, 收集金属铷与样品水反应生成的氢气, 以同

位素质谱计测定。氧用二氧化碳平衡法, 真空下通过 CO₂ 与样品水的同位素交换反应(25 °C) 达平衡后, 收集 CO₂ 气体, 交同位素质谱计测定。

使用仪器: MAT251 同位素质谱计, 对 SMOW 标准样品测定精度: 氢同位素为 ±0. 1%; 氧同位素为 ±0. 001%。

表 1 镜泊湖地区水体的 δ¹⁸O 和 δD 值
Table 1 δD and δ¹⁸O of the water in Jingbohu

样品 编号	样品	采样 高程/ m	δD _{SMOW} (‰)	δ ¹⁸ O _{SMOW} (‰)	d = δD - 8δ ¹⁸ O	T/ TU
1	裂隙潜水	419	- 89. 4	- 11. 19	0. 12	14
2	裂隙潜水	405	- 92. 4	- 11. 48	- 0. 56	15
3	裂隙潜水	420	- 95. 5	- 11. 33	- 4. 86	18
4	湖 水	360	- 92. 1	- 11. 04	- 3. 78	14
5	潭 水	350	- 94. 4	- 10. 92	- 7. 04	17
8	湖 水	365	- 89. 7	- 11. 08	- 1. 06	10
9	微承压裂隙水	389	- 85. 7	- 10. 91	1. 58	13
10	井 水	378	- 87. 1	- 10. 37	- 4. 14	9

分析者: 中国地质大学(武汉) 测试中心黄俊华; 取样位置见图 1

表 2 镜泊湖地区水体水化学分析(mg/L)

Table 2 The chemical analysis data of the water in Jingbohu (mg/L)

样品 编号	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	矿化度	Cl/Na	Cl/F	Mg/Ca
1	2.08	8.90	19.24	10.21	4.01	25.94	84.93	0.40	171.70	0.451	10.0	0.531
2	5.38	9.98	20.44	11.67	1.99	2.88	126.62	0.40	193.42	0.199	4.98	0.571
3	5.20	10.99	19.24	10.94	1.99	0	132.66	0.28	178.95	0.181	7.11	0.569
4	2.16	5.11	10.82	5.84	1.99	25.94	42.23	0.24	96.39	0.389	8.29	0.540
5	3.24	5.56	10.82	5.11	1.99	20.17	48.21	0.20	93.37	0.358	9.95	0.472
8	1.66	3.69	12.83	6.32	1.99	27.86	48.21	0	96.44	0.539	9.95	0.493
9	0.81	12.43	33.67	18.24	1.99	0	211.01	0.16	225.49	0.160	12.4	0.542
10	12.83	20.67	127.45	49.61	75.99	149.85	217.11	0	737.54	3.68		0.389

分析者: 成都理工大学环工院许国林; 采样位置见图 1

2. 2 水体的同位素组成及常量元素地球化学特征

(1) 湖水: 区内主要水体, 属低矿化度的 HCO₃-SO₄-Ca-Mg 型。两个采样点水的同位素组成: 4 号样品 δD 为- 92. 1 ‰, δ¹⁸O 为- 11. 04 ‰, T 为 14 TU; 8 号样品 δD 为- 89. 7 ‰, δ¹⁸O 为- 11. 08 ‰, T 为 10 TU。根据全球大气降水方程计算所得的氘过量参数(d) 值^[1- 3] 分别为- 3. 78 和- 1. 06。两者相比, 吊

水楼湖水的同位素组成 δ¹⁸O、T 值较高而 δD 和 d 值较低。说明两地的湖水均存在一定程度的地下水向湖水补给的情况, 吊水楼处的地下水水量大些。这种地下水源于较高的补给区(δD 较低、T 较高为特点), 由于较长时间的水/岩作用, 补给途径长, 导致 δ¹⁸O 升高, d 值较低^[4, 5]。

(2) 基岩裂隙水: 本区基岩裂隙水主要有风化构造裂隙潜水和微承压构造裂隙水。

风化-构造裂隙潜水均属低矿化度 HCO_3^- - Ca - Mg 型。各项化学组分指标均高于湖水。三个泉眼的 δD 、 T 和 d 值存在相关关系,表明浅部裂隙水之间没有直接的水力联系。3号泉的补给高度最大,径流较长,主要是当年的大气降水,与深部地下水不存在直接的关系。

微承压构造裂隙水的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 略高于其它浅层裂隙水,但 K^+ 、 Cl/Na 较低, Cl/F 、 Mg/Ca 略高,属低矿化度 HCO_3^- - Ca - Mg 型。 δD 为 -85.7‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 为 -10.91‰ , T 为 13 TU, d 为 -1.58 。与其它水体相比, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 d 都相对较高, T 较低,表明其补给高度较低,运移途径短。该水样的 δD 达本区的最高值, $\delta^{18}\text{O}$ 也近于最高值, d 为 -1.58 ,也是区内最高值,显示其水/岩作用不太明显,水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值同时升高,意味着存在开放性蒸发作用影响的可能性。可以肯定,这一泉水露头没有深部地下水的介入。

(3) 地下水:5号样与10号样为地下热水。5号(吊水楼瀑布下的深潭水)与湖水几乎一致,属低矿化度 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca - Mg 型, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 T 与湖水有微小变化, d 全区最低,这一变化与水化分析结果不相匹配,意味着同时受蒸发作用和水/岩作用的影响。10号样(镜泊乡热水井)属低矿化度的 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca - Mg 型,矿化度 $0.737\ 54\text{ g/L}$,其中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量相当于湖水含量的10倍以上。井水的 δD 为 -87.7‰ 与9号样微承压裂隙水近似, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -10.37‰ 系全区水体的最高值, T 为 9 TU, 全区最低, d 值为 -4.14 。这些特点显示出水体的滞留时间较长,受蒸发和水/岩作用的影响明显。井水的化学成分和水的同位素组成与其它水体相比均显示明显的异常。

由图2可见,区内各水体都来源于大气降水,其同位素组成均落在大气降水范围。但与全球大气降水线存在明显的偏移,且沿蒸发线的方向展布。其中以10号井水样品为代表,分布在 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 较高的端员上,而浅层裂隙水2号、3号样品落在 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 相对较低的端员,大体上显示出补给来源的差异。尽管两种端员水都受到了蒸发作用的动力同位素分馏的影响,但 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 相对较高的端员水明显地叠

加了水/岩作用的影响,这可能是在热力学同位素分馏效应的驱使下,通过水/岩的氧同位素交换,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 明显升高;这一变化与所处的环境温度亦呈正相关关系。湖水样品4号、8号落在两端员水之间,反映了湖水是这两端员水的混合体。由于湖面积较大,水的深浅不同,特别是很深的部位,不同水体的来水量有别,一时难以均匀混合,其同位素组成可能出现一定的偏移^[1]。

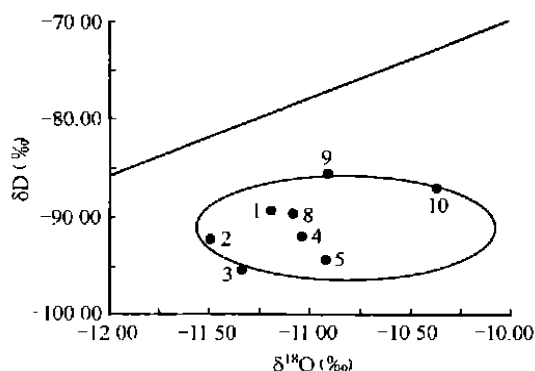


图2 镜泊湖水体同位素组成

Fig. 2 Diagram of δD - $\delta^{18}\text{O}$ of the water bodies in Jingbohu

以10号样品为代表的端员水实际上也是一种混合水,是浅地表的冷水和深部出露的、经改造的、与地热有关的水的混合体,反映了水体与地下深部循环的地下水有一定的关联。

图3是 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值计算后, d 值与 T 值的投影;表明受热力学分馏效应影响明显的端员水的氡含量(T)要低些。因为一般深部地下水的滞留时间较长,几乎不含氡,而水/岩作用影响明显,尤其是地热水 d 值较低。这些泄漏水与近地表水混合所占比例越大,低氡含量和低 d 值的特点越明显。

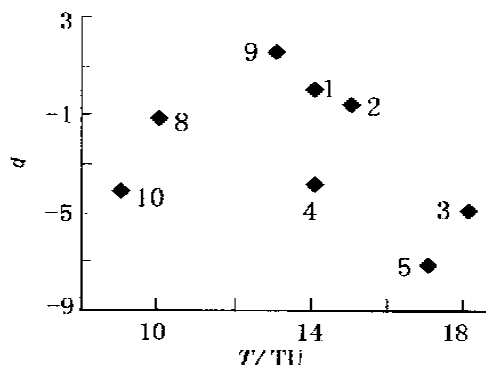


图3 镜泊湖地区水体 d 值和 T 值关系

Fig. 3 The relation of d and T of different water bodies in Jingbohu

3 镜泊湖水体微量元素地球化学特征

水样的微量元素中子活化分析结果见表 3。

表 3 镜泊湖水体的中子活化分析结果(10⁻⁹g/L)

Table 3 The neutron activation analysis results of Jingbohu

样品号	1	2	3	4	5	8	9	10
La	75.5	179.8	125.2	183	31.7	31.1	42.8	465
Ce	635	1373	841	4797	1587	7403	3112	811
Nd	<i>n</i>	<i>n</i>	662	626	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
Sm	7.7	118	17.9	40.4	5.6	69.3	2.9	63.4
Eu	8.4	13	19.7	10.0	4.8	15	13.5	26.6
Tb	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	11.6	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
Lu	3.3	88.9	5.0	15.4	<i>n</i>	10.1	<i>n</i>	46.5
Ag	600	2127	< 152	60.7	< 46	< 122	< 90	< 265
As	1802	1237	984	5096	2380	8462	7554	2433
Co	141	251	197	125	56	187	36.1	243
Cr	126	175	121	201	5.6	9.7	3.5	8.9
Cs	48	60	26.8	37.6	29.9	140	42	70
Hf	<i>n</i>	15.5	25	11.6	<i>n</i>	44	<i>n</i>	<i>n</i>
Rb	446	1180	1557	1214	1139	1762	496	1475
Sb	46.4	77.3	82.3	116	56.9	234	149	229
Sc	20.6	65.7	51.9	29.9	8.4	206	7.2	30.2
Sr	79	156	143	94.0	70.8	58.3	111	647
Ta	< 1.3	13.1	<i>n</i>	10.6	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
Th	10.3	60	25	45.3	5.6	122	11.3	44
U	< 80	< 135	< 84	< 83	< 56	< 62	519	< 287
Zn	8242	24 360	3758	10 018	1867	7684	8456	28 026
Ni	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>
Au	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>n</i>

注: *n* 为未达检测限; 分析者: 成都理工大学应用核技术研究院童纯茵、刘晓辉

由表 3 可见, 10 号水样元素含量与其他水样相比, 微量元素为最高值的有 La、Eu、Sr, 常量元素最高值有 K、Na、Zn、Cs 含量也较高。9 号水样元素含量与其它水样相比为最低值的元素有 Sm、Co、Cr、Sc、Rb、La 相对较低, U 含量为全区最高。

水样分析中稀土元素主要有 La、Ce、Sm、Eu 等轻稀土元素, 重稀土元素仅见 Sc, La、Ce 含量高于 Sc, 而 Sm、Eu 则相反。在 10 号样品中, 除 Eu 外, 轻稀土元素的含量均高于重稀土, 显示出水体富轻稀土、贫重稀土组分的特征, 且 Eu 存在一定的亏损。

微量元素 Sr、Ba 含量较高, Rb、Cs 较贫, Th、U 含量较低。这一变化与黑龙江穆棱燕山中期火山岩和沸石矿及原岩稀土元素分配模式的变化特征十分近似; 说明水中微量稀土的含量的变化, 正是与水—岩作用紧密相关。最为突出的是 10 号样中的 La、Eu 比其他水样都高得多(与 9 号样相比差别十分明显), 且 K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 的含量也远远高于其他水体, 这很可能反映了 10 号水体与深部热储层中的沸石矿流体有成因上的联系, 尽管这些流体在循环上升的过程中混有相当数量的浅部冷水, 但也掩盖不住深部热水的主要特征。

4 镜泊湖地区地热储存状态分析

镜泊湖地区特殊的区域地质构造背景为地热的储存提供了优越的条件。

(1) 本区处于敦密深大断裂带上。断裂带宽 10 ~ 20 km, 深达上地幔, 自中生代以来长期而频繁活动使两侧的次级裂隙异常发育, 至今沿断裂带有多次浅源及深源地震。断裂构造裂隙带不仅有利于深部热能的上涌, 也为浅部流体的运移提供了通道。

(2) 本区位于岩浆喷发带, 第三纪以来火山喷发频繁, 一直延续到第四纪全新世。区内玄武岩覆盖面积达 98% 以上, 玄武岩熔岩的总厚度 400 m 以上。这无疑表明本区地壳厚度较薄, 容易受深源地热能的影响; 较厚的玄武熔岩成为地下热流体的保温盖层, 使下伏的储热层中的热流体难以外泄。

(3) 区内玄武熔岩的下部为第三系弱胶结碎屑岩和白垩系上统主要为海浪组含砾砂岩、砂岩、凝灰质砂岩; 白垩系下统猴石沟组为凝灰岩、凝灰质细砂岩, 上统与下统的厚度达 2800 m, 是本区主要的地下承压含水层。其下城子河组为中细粒砂岩、粗粒砂岩、泥岩和煤层, 厚 500 多米, 为相对隔水层。白垩系海浪组和猴石沟组为沸石的重要含矿层。

(4) 白垩系海浪组和猴石沟组为本区最上部的地下含水层, 所含沸石含矿层中斜发沸石的形成温度为 100~ 130℃^[6], 系典型的水/岩热蚀变产物, 指示这一地层为典型的热流体储温层。这一承压含水层对本区地热资源的开发具有极为重要的意义。

(5) 本区地表温泉少见, 主要是由于表层玄武熔岩覆盖层较厚, 加之玄武岩的裂隙构造不发育, 地下热流体难以上涌, 浅层地下裂隙水也很难与底部地

下水层沟通, 浅部水体中元素和同位素地球化学特征一般未见异常。

10 号样品的化学组分和同位素组成有较大的异常: 1) Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量异常高, 一般为其它水体含量的 5 倍以上。 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 明显受到下伏白垩系海浪组 and 猴石沟组的斜发沸石含矿层流体的影响。井水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 也来自底部白垩系沉积层。同样说明该地玄武岩厚度较小, 或者开放性的构造裂隙较发育, 新的构造活动为下伏流体外逸创造了条件; 2) 10 号井的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 都较高, d 值和 T 值都较小。从同位素分馏理论分析, 可见其氢和氧都相对富重同位素, 明显受蒸发作用的影响; 此外, d 值较小, T 值较低, 反映这种水体受水/岩作用的影响较为明显, 同时也有部分滞留时间长(T 值低)的深部地下水上逸。

(6) 9 号采样点为本次调查的次异常区, 化学组分明显高于其它水体, 但与 10 号水样相比都低得多, 且 Cl^- 低至与湖水相当, 基本不含 SO_4^{2-} , 显示与地下深部水毫无关联。然而, 其 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 d 和 T 都较高, 反映受蒸发作用的影响明显, 最可能属“顶板”加热型, 深部地热不能直接到达地面, 而是通过一隔层加热上部的水, 上部的水受热后, 在蒸发的同时加速了岩石中化学组分的离解; 但水中的元素及化学组分含量有一定的限度。这种情况一般出现在岩石盖层不太厚且构造裂隙不太发育的地方。

(7) 本区大多数浅层的基岩裂隙水补给高度一般都较大, 径流速度中等, 与深部循环地下水不存在直接联系。这些水以 d 值和 T 值高、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值

低为特点, 矿化度及 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等离子浓度略高于湖水。

参考文献(Reference):

- [1] 尹观. 同位素水文地球化学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988. 68– 100, 145– 146.
Yin Guan. Isotope Hydrology Geochemistry [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1988. 68– 100, 145– 146. (in Chinese)
- [2] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 73– 75.
Wang Hengchun. General Outline of Isotope Hydrogeology [M]. Beijing: Geology Press, 1991. 73– 75. (in Chinese)
- [3] Gat J R, Gorfiantini R. Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle[M]. Vienna: IAEA, 1981: 103– 139.
- [4] 尹观, 倪师军, 张其春. 水体氘过量参数及其水文地质学意义[J]. 成都理工学院院报, 2001, 7(3):
Yin Guan, Ni Shijun, Zhang Qichun. Deuterium Excess(d -excess) Parameter and its Geohydrology Significance [J]. Acta of Chengdu Institute of Technology, 2001, 7: (3). (in Chinese with English abstract)
- [5] 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, (4): 409– 411.
Yin Guan, Ni Shijun. Evolution of groundwater deuterium excess(d -excess) parameter. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, (4): 409– 411. (in Chinese with English abstract)
- [6] 徐旃章, 张寿庭. 黑龙江穆稜沸石矿田沸石资源调查评价与开发利用[R]. 成都理工大学, 大庆地质录井公司, 2001.
Xu Zhanchang, Zhang Shouting. The Evaluation and Exploitation of Zeolite Mineral Resource in Muling, Heilongjiang[R]. Chengdu University of Technology, Daqing Oil Field Geology Co., 2001. (in Chinese)

Studies of Isotope and Element Geochemical Characters in Water Bodies And Exploitation Prospects of Geothermal Water in Jingbohu Area

SHANG Ying-nan, XU Zhanchang, YIN Guan

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Based on the information of isotope composition and element analysis data in Jingbohu, this paper traces pathway, and analyses the recharge altitude, hydraulic connection in different water bodies in this research area and information about deep geothermal source. This paper also analyses the advantage condition of regional geology background for geothermal resource. Jingbohu is located in deep faults and volcano activity zone, so it has sufficient heat energy to supply. In this area, upper layer is thicker basaltic lava that is beneficial to store geothermal resource. The lower layer is the main highly phreatic Cretaceous strata, and enriches hydrothermal alteration product—clinoptilolite ledge, so we could demonstrate the possibility of existence of geothermal water.

Key words: Jingbohu; isotope composition; element geochemistry; geothermal water