冀西北蔚县盆地地热资源赋存特征及勘查开发方向

李泓泉1),张树胜1),谢明忠2),周江1),周建飞1),贾立新1),郝星波1),任建帅1),刘永平1),于丹丹2)

1)河北省煤田地质局第四地质队,河北宣化,075100;

2)河北省煤田地质局环境地质调查院,石家庄,050085

内容提要: 蔚县盆地属于断陷盆地型层状热储低温地热田。中元古界长城系—蓟县系为热储层,上地幔传导热为主要热源。盖层主要由第四系和侏罗系构成,寒武系—奥陶系也起到了盖层的作用。以阳原南山断层和蔚县南山断层为南、北边界的蔚县地块呈一总体倾向 SE 的单斜构造,蓟县系等地层埋藏深度由北西向南东逐渐加深。盆地北部山区出露的长城系—蓟县系接受大气降水后,顺层向深部运移,运移过程中不断有沿破碎带、裂隙垂直下渗的相邻含水层水补给。蔚县南山断层阻断地下水继续向南运移的路径。经过深循环并被上地幔传导热加热后的地下水封闭或半封闭于长城系—蓟县系中形成层状热储。热储层埋藏深度较大的壶流河以南地区,特别是大型断层附近,以及松枝口—右所堡等张性大断层与阳原南山断层、蔚县南山断层等 NE 向阻水大断层的交汇部位,如三马坊、北洗冀、麦子疃东等地带,次级断裂构造较发育,岩石破碎,利于地热流体的存储和运移,应作为今后地热资源勘查和开发利用的重点区域。

关键词:中元古界长城系—蓟县系;层状热储;低温地热田;蔚县盆地

冀西北蔚县盆地西与山西大同地区接壤,东隔 涿鹿、怀来两县,至北京延庆区直距120 km。《中国 地热资源——形成特点和潜力评估》(陈墨香等, 1994)据地质构造和盆地类型,将其纳入汾渭盆地 系(山西地堑系)一并讨论,《河北地热》(张德忠等, 2013)则把蔚县盆地和阳原盆地统称为蔚县—阳原 山间盆地,并划归冀西北山间盆地地下热水区。这 些文献中,虽然有关于蔚县盆地地热异常的记录,但 往往只是局限于对异常区(点)的一般性描述,或仅 有对盆地热储类型的大致归类和概括,缺少对盆地 地热系统的全面总结。同时部分单位和学者也有相 关的研究和报导(河北省煤田地质局第四地质队●: 河北省地勘局第三地质大队²;李业震,2004;周江, 2019:郝星波,2019),但同样存在研究程度不够深 人、系统的问题,甚至还出现了分属传导性层状热储 和对流型带状热储的不同认识。从陈墨香等 (1994)对汾渭盆地系整体地热地质条件的评价看, 蔚县盆地属于那种箕形构造盆地,新生界厚度薄,受 冷水流的影响,地温普遍偏低,地热资源潜力一般。

自 20 世纪 80 年代以来,河北省煤田地质局第 四地质队等多家地勘单位,在蔚县地区开展了大量 煤炭勘查及与之相关的水文地质勘查工作,近期针 对地热资源也做了部分物探工作,积累了丰富的地 质资料(河北煤田地质勘探公司第一勘探队^{●,●};河 北煤田地质勘探公司水文地质队[●];河北省煤田地 质局第四地质队^{●,●})。笔者等在对以往地质成果 中有关地层、构造、水文地质和地热等方面的资料进 行全面分析研究的基础上,对蔚县盆地地热资源的 分布和赋存特征进行探讨,以期为当地正在围绕首 都"两区"建设,大力推进的农产品供应基地建设和 旅游产业发展事业,提供地热资源勘查和开发利用 方面的地质依据。

笔者等认为,蔚县盆地是冀西北山区具有相对 较高大地热流背景,面积较大,盖层较厚,长城系— 蓟县系为热储层的断陷盆地型低温地热田。周边的 蔚县南山断层、壶流河断层和松枝口—右所堡断层 等深大断层,阻隔了盆地内、外地下水水力联系,地 表、地下水系统均是一个相对独立的单元。接受大 气降水和邻近含水层水补给的长城系—蓟县系含水 层水经深循环,被源自上地幔传导热热源加热后,封 闭或半封闭于其中形成热储。松枝口—右所堡等张 性大断层两侧次级构造发育,岩石较破碎,不但利于

收稿日期:2020-03-07;改回日期:2020-06-06;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.04.010

作者简介:李泓泉,男,1972年生,高级工程师,主要从事能源矿产勘查管理和技术研究;Email:365237075@qq.com。通讯作者:张树胜,

男,1961年生,正高级工程师,主要从事煤田地质及新能源矿产勘查及研究; Email:zjkzss.01@163.com。

地下水的下渗补给,也为地热流体提供了储存空间 和上升通道,所以断层附近热储水量往往更加丰富, 甚至在水位压差作用下,热水沿大断层上升到浅部 地层,赋存于岩石孔隙、裂隙及断层破碎带中成为二 次热储。热储赋存深度、水温和水量能够满足当前 地热资源勘查和开发的经济技术条件要求,地热资 源前景较好。

1 地质背景

1.1 区域构造及地热地质背景

蔚县盆地在大地构造位置上处于中朝准地台 (I_2)燕山台褶带(II_2^3)冀西陷褶断束(III_2^3)蔚县复 向斜(IV_2^7)蔚县开阔向斜(V_2^{13})构造单元内,属于山 西地堑系北部拉张区的一部分(河北省地质矿产 局,1989;河北省地矿局第三地质大队,张家口市国 土资源局,2013)。

山西地堑系位于鄂尔多斯块体的东部和南部. 夹持于北北东向的吕梁山与太行山之间,其中又被 北东—北北东向的恒山、五台山、中条山和其他隆起 分割,由一系列方向不同的断陷盆地及其内部次一 级隆起、凹陷组成,从北往南有大同盆地、忻定盆地、 太原盆地、临汾盆地和运城盆地等。其东北端转为 北东东向而延伸入河北北部形成蔚县盆地、延怀盆 地,西南端也转为北东东方向延伸入陕西境内称为 渭河盆地,平面上总体呈"S"形展布,总长度约1200 km。盆地系经燕山运动形成雏形,新生代继承性发 展为新的强烈断陷的构造盆地。各盆地受断裂控制 以 NE—NEE 雁行式排列,彼此断续相接。陈墨香 等(1994)认为,山西地堑系的"地热背景并非如预 期的那样高或有明显异常。除最北端延庆盆地有 77 mW/m² 热流值记录外,比较可信并有区域代表 性的大地热流值在盆地或盆地周边约为 50~70 mW/m²,与华北盆地大体相近"。并根据盆地系北 段的多数盆地在剖面上均具有箕形构造,仅箕底部 小范围新生界厚度较大,其余部位一般只有千米左 右以致更薄;北段许多盆地因范围狭窄,地下水径流 强烈,特别是在富水的奥陶纪碳酸盐岩为底托的盆 地,区域性的地温负异常特别明显(如太原盆地北 段、忻县盆地南段以及大同盆地部分地带,地层相对 浅部几乎观测不到地温随深度增高或者只有很小的 地温梯度值)等特征,认为山西地堑系多数盆地的 地热潜力逊色于邻近的华北盆地。同时指出,地热 资源潜力较大的区域为诸如渭河、运城盆地等大型 盆地,以及特定的地质构造条件形成的温泉出露区

和局部相对高温区。

蔚县盆地位于山西地堑系的最北端,虽是一个 箕形构造盆地,但平原区面积超过1500 km²,盖层 厚度较大的范围占据了盆地一半以上,尤其是盆地 南部新生界、中生界和古生界总厚度1000 m 左右, 不论是在厚度还是保温性能方面都为下伏长城系— 蓟县系热储层提供了较为有效的盖层条件。并且, 区内有多处地热异常显示,紧邻的阳原澡洗堂一带 (历史上)还有温泉出露,具有较好的地热资源赋存 前景。

1.2 盆地基本构造特征

蔚县北山(月山)、南山(地表分水岭以北)及其 所夹持的蔚县盆地构成了蔚县开阔向斜。蔚县开阔 向斜的主体部分被四条诞生于不同时代的大断层所 围割(图1),形成一个相对独立的 NE 向矩形"断 块",其总体构造形态为一轴向 NE 的开阔复向斜构 造。阳原南山断层是蔚县开阔向斜的北界,为向北 倾斜的正断层。位于蔚县开阔向斜南翼,"块断"南 缘的蔚县南山断层为一向北倾斜的新生代活动正断 层。由于喜马拉雅期蔚县南山断层和阳原南山断层 的活动,使该矩形"块断"产生北升南降的掀斜,而 使复向斜的构造形态不甚明显,呈一总体倾向南东 的单斜构造(图2)。在舒缓开阔的复向斜衬底上, 发育有壶流河断层、月山向斜和蔚县背斜等主要次 级构造形迹。松枝口—右所堡断层和大湾—暖泉断 层是两条 NNW 向的现代活动断层,并具多期活动 的特点,构成"块断"的东、西边界。在新生代盆缘 断层伸展过程中,起到调整断层的作用,其南段表现 出相当强烈的现代活动性(河北煤田地质勘探公司 第一勘探队^{❸,●}:河北煤田地质勘探公司水文地质 队●;河北省煤田地质局第四地质队●~●;张弼斌等, 1988)。围割"块断"的四条大断层在控制地下水系 统方面发挥了重要作用,不仅阻隔了盆地内、外地下 水的水力联系,也为地下热水的储存和上升提供了 空间和通道。其特征为:

蔚县南山断层:为蔚县—延庆区域大断裂的蔚 县段,西起山西广灵县,向东经松枝口、黑山寺、狼山 至延庆,延展长度大于150 km。断层走向 NE,倾向 NW,局部断距达千余米。从区域应力场及构造特 征分析,该断层在燕山期(或更早)即开始活动,在 NW—SE向挤压应力作用下,由北往南逆冲,其活动 对蔚县煤田的保存具有重要的控制作用。进入喜马 拉雅期,区域应力场发生反转,在 NW—SE 向拉张 应力场作用下而形成正断层,现今仍有活动,为一条



图1 蔚县盆地构造纲要及地质略图

Fig. 1 Structure outline map and schematic geological map of the Yuxian Basin



多期活动的区域性大断层(张弼斌等,1988)。该断 层阻挡了蔚县盆地地下水向南径流的路径。

阳原南山断层:也称洋河断层,走向 NE,倾向 NW,西起化家岭以西,向东经南马圈,在壶流河与 桑干河交汇处切过松枝口断层,沿桑干河向东延伸, 延伸长度约 100 km。与蔚县南山断层一样,该断裂 具有早期挤压,并由北向南逆冲和多期活动的性质, 于喜马拉雅期发生反转形成正断层(张弼斌等, 1988)。该断层与蔚县南山断层一起控制了蔚县 "块断"的演化,并是阳原盆地与蔚县盆地地下水径 流通道的天然屏障。

松枝口—右所堡断层:走向 NW—NNW,南起松枝口,向北沿壶流河经化稍营、右所堡、马市口延入内蒙境内,全长大于 130 km。该断层早在中元古代即已存在,中生代继承性活动,造成其两侧的中生代盆地,在沉降幅度或褶皱强度等方面均有显著差异。 蔚县地区在断层西侧中侏罗统发育,而东侧发育有厚度较大的下白垩统,表现为 NE 倾向的正断层性质。据下花园组煤系赋存深度推测,其断距大于1000 m(河北省煤田地质局第四地质队[®])。该断层具有形成时间早、多期次活动的特点,同时在重力场中反映为清楚的梯级带,被列为区域性大断裂。断层两侧地下水联系不密切。

大湾一暖泉断层:走向 NW—NNW,倾向 NE,与 松枝口—右所堡断层近于平行,南起暖泉镇西南,向 北经大湾、化家岭继续向西北延伸,延展长度大于 30 km。根据现有地质资料分析,该断层在地史片断 中曾具有平移和挤压的双重性质。侏罗纪早期断裂 活动较弱或未活动,第四纪晚期,伴随蔚县南山断层 的反转活动,其南段活动较强,并在一定程度上阻滞 了断层两侧地下水的流通。

1.3 地层

 蔚县盆地地层属于华北地层大区(V)晋冀鲁

 豫地层区(V₄)中的燕辽地层分区(V₄⁷)(陈晋镳

 等,1997)。区内发育地层由老至新依次为:新太古

 界桑干群(Ar₃¹S.)变质岩;中元古界长城系大红峪

 组(Jxd),蓟县系高于庄组(Jxg)、雾迷山组(Jxw)和

 铁岭组(Jxt);古生界下寒武统—上寒武统($€_{1-3}$)和

 下奥陶统(O₁);中生界中侏罗统下花园组(J₂x)、九

 龙山组(J₂ j)、髫髻山组(J₂t),上侏罗统后城组

 (J₃h)和下白垩统张家口组(K₁z);新生界古近系

 (E)和第四系(Q)。其中,长城系和蓟县系为主要

 热储层,下伏新太古界桑干群为结晶基底,其它为盖

 层。

1.4 地貌水系及地下含水层

1.4.1 地貌水系

蔚县盆地地处燕山沉降带的西北部,恒山余脉 从晋入冀,分南、北两支,北为月山,南为蔚县南山, 中夹走向北东的地堑式山间盆地。盆地四周群山环 抱,南北高山耸立,中间低平。主要山峰均在海拔 2000 m 左右。盆地内地表水系有壶流河,流域长度 120 km,属永定河水系。发源于山西广灵县,自西向 东流经蔚县,于西合营附近流向转北,在小渡口附近 汇入桑干河。汇水面积约 4300 km²,年平均流量 6.25 m³/s(河北煤田地质勘探公司水文地质队[●]; 河北省煤田地质局第四地质队[●];河北煤田地质勘 探公司第一勘探队[●])。

1.4.2 含水层的划分及特征

根据地层时代、岩性及含水特征,区内与热储关 系密切的含水层可分为碳酸盐岩类岩溶裂隙水、变 质岩及火成岩裂隙水、碎屑岩类裂隙孔隙水三个含 水岩组9个含水层(表1)。

1.4.3 地下水的补给、径流和排泄条件

蔚县盆地四周群山隆起,周边山脊形成地表分 水岭,其外侧分布的新太古界片麻岩、侵入岩构成地 下分水岭。盆地为一面积大,封闭条件好,完整的水 文地质单元。它与壶流河水系的控制范围大体一 致,称之为壶流河单元(河北煤田地质勘探公司水 文地质队[●];河北省煤田地质局第四地质队[●];河北 煤田地质勘探公司第一勘探队[●])。

盆地四周山区基岩裸露,风化强烈,沟谷纵横, 接受大气降水补给,为盆地补给区。蔚县南山蓟县 系雾迷山组、寒武系、奥陶系灰岩岩溶裂隙较发育, 植被茂盛,利于降水入渗蓄存,以不同的方式沿导水 网络缓慢向山前运移,入山前冲洪积扇,并沿壶流河 南岸的群泉排泄。北部山区(月山)有侏罗系广泛 出露,降雨沿基岩风化裂隙多补给山前倾斜平原的 第四系含水层,并沿壶流河排泄。大湾-暖泉断层 以西有奥陶系灰岩大面积出露,分布面积约700 km²,接受降水补给后由西北向东南径流,于壶流河 北岸的广灵水神堂和暖泉等泉群排泄。月山向斜北 翼寒武系灰岩多数以带状分布,分布面积约50 km²,接受降水入渗补给后经月山向斜深循环后向 南径流,寒武系灰岩水在露头区有零星泉水排泄,在 掩盖区排泄不良。长城系—蓟县系含水层在北部露 头区接受降水入渗补给,在掩盖区导水断层附近接 受相邻含水层越流补给,排泄条件不良。

1.5 蔚县及邻区地热异常

据有关资料(张德忠等,2013;河北省地矿局第 三地质大队等,2013;河北省地矿局第三地质大 队^④;李亚震,2004;河北省煤田地质局第四地质 队^{①,}[®]),蔚县及邻区目前发现有五处地热异常,分 述如下:

(1)阳原三马坊乡澡洗堂地热田:位于阳原新 生代断陷盆地东部的三马坊、澡洗堂一带,现有地热 井11眼,揭露地热流体温度 25~41 ℃,为受松枝 口—右所堡断层和阳原南山断层直接控制的低温地 热田。盖层为第四系下更新统湖积黏性土,厚度一 般 150~200 m。因其紧邻蔚县盆地,故本文一并讨 论。

(2)北洗冀地热异常区:位于北洗冀、莲花池村 一带,蔚县新生代断陷盆地东部的松枝口—右所堡 张性大断层与壶流河断层的交汇地带附近,有多口 机井揭露到地热水。北洗冀村机井,井深 350 m,上 部揭露第四系厚度 280 m,其下为蓟县系白云岩。 该井为自流井,井口水温 32 ℃,自流量 30 m³/h 以 上。水质类型为 HCO₃⁻ · SO₄²⁺ - Ca²⁺ · Mg²⁺型水,矿 化度 0.43g/L。莲花池村东机井,井深 350 m,揭露 上部第四系厚度 300 m 左右,其下 50 m 为蓟县系白 云岩,自流井口温度 32 ℃。西方城西洗煤厂机井, 井深 500 m,揭露第四系厚度 380 m,其下穿过 70 m 下花园组后,揭露蓟县系白云岩 50 m 左右。该井取 水为混合含水层水,水位埋深 30 m 左右,水温 28 ℃。

(3)暖泉地热异常区:位于壶流河断层与大 湾—暖泉断层交汇处附近,热水出露于第四纪泥河 湾期砂砾石层中,泉水温度 20 ℃左右,最大流量 540 m³/h,水质类型主要为 HCO₃⁻⁻→Na⁺型水。 系深部的奥陶系灰岩含水层水经地下自然增温加热 后,在水头压力作用下,自流溢出地面形成的温泉 (受煤矿开采影响,已停涌多年)。

(4) 卜南堡地热井: 2001 年, 蔚县公用事业局 在蔚县城西约 2 km, 壶流河北岸的卜南堡村边施工 一口地热探采结合井, 井深 1167 m。热储层为蓟县 系雾迷山组白云岩, 揭露厚度 124.5 m, 岩溶裂隙发 育, 富水性极强。含水层(出水段) 埋深 1084~1112 m和 1137~1160 m, 累厚 51 m。井口水温为 38 ℃, 水位高出地面 39 m, 自流水量 327.06 m³/h, 井口压 力达 0.34 MPa, 为低温岩溶裂隙地下热水。地热水 的水 化学类型为 HCO₃⁻⁻—Ca²⁺ · Mg²⁺型, 矿 化度 0.483 mg/L。上覆第四系和侏罗系厚度分别为 373

				-				
含水 类型	地层	层 编 含		単位涌水量 [mL/(s・m)]	地下水类型	富水性	水质类型	性质
岩溶裂隙水	Ch+J _x w	Ι,	蓟县系(长城系)白 云岩岩溶含水层	>100	岩溶水	中等-强	$\mathrm{HCO}_{3}^{-}-\mathrm{Ca}^{2+}\cdot\mathrm{Mg}^{2+}$	
	e	I ₂	寒武系灰岩含水层	8.47	岩溶裂隙水	→ 隙水 弱 HCO ₃ ⁻ ・Cl ⁻ -Na ⁺ (HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺) ^{**}		
	01	Ι 3	奧陶系下统灰岩含水 层	332~3860	岩溶裂隙水	中等-强	$HCO_{3}^{-}-Ca^{2+}(HCO_{3}^{-}-Ca^{2+}\cdot Mg^{2+})$	
火成岩裂隙水	$\operatorname{Ar}_{3}^{1}s.$		新太古界变质岩风化 裂隙含水层		风化裂隙水	极弱	$HCO_3^ Mg^{2+} \cdot Na^+$	
	βμ		喜马拉雅期火成岩裂 隙含水层		裂隙水	弱	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+$	承压
	J_2t	IV 1	髫髻山组火成岩裂隙 含水层	2.53	裂隙水	弱	$\mathrm{HCO}_{3}^{-}-\mathrm{Na}^{+}\cdot\mathrm{Ca}^{2+}$	
裂隙孔隙水	J ₂ x	П	下花园组砂岩孔隙裂 隙含水层	0.0328~27.4	孔隙裂隙水	弱	$HCO_{3}^{-}-Na^{+} \cdot Ca^{2+}(HCO_{3}^{-} \cdot SO_{4}^{2-}-Na^{+})$	
	$J_2 j$	Ш	九龙山组砂岩砾岩孔 隙裂隙含水层	0.0441~1.64	孔隙裂隙水	弱	$\mathrm{HCO}_{3}^{-}\cdot\mathrm{Cl}^{-}-\mathrm{Na}^{+}\cdot\mathrm{Ca}^{2+}$	
	J ₃ h	IV 2	后城组砾岩孔隙含水 层	0. 279~167	孔隙裂隙水	弱-中等	$\text{HCO}_{3}^{-} \cdot \text{Cl}^{-}-\text{Na}^{+} \cdot \text{Ca}^{2+}$	

表 1 蔚县地区含水层划分表 Table 1 The aquifer divided of Yuxian area

注:^{**}括号"()"内水质类型为次要类型,有时出现。表中数据来源:河北煤田地质勘探公司水文地质队[●];河北省煤田地质局第四 地质队[●];河北煤田地质勘探公司第一勘探队[●]。 m和37m,奥陶系和寒武系总厚度632.5m。

(5) 麦子疃地热井:为探采结合井,位于蔚县南 杨庄乡麦子疃村东约 200 m,井深 2954 m。0~ 230. 20 m 为第四系松散层;230. 20~891. 75 m 为侏 罗系后城组砂砾岩;891. 75~1676. 60 m 为蓟县系雾 迷山组白云岩;1676. 60~2816. 25 m 为高于庄组、大 红峪组白云岩、泥质白云岩,下部夹潜流纹岩、砂岩 和页岩;2816. 25 m 以下为花岗闪长岩。热储为雾 迷山组和高于庄组岩溶裂隙、孔隙水,主要富水段深 度 1732~2950 m,有效热储层厚度为 567 m。井口 水温 42 ℃,静水位为 87 m,单井最大允许产出量 1482. 53 m³/d。水化学类型为 HCO₃⁻-Na⁺·Mg²⁺· Ca²⁺型(河北省煤田地质局第四地质队[●])。

2 盆地地热地质特征

2.1 地温场条件及热源分析

2.1.1 莫霍面深度分析

冀西北山区莫霍面深度为41~45 km,由北西向 南东逐渐变浅,反映了地壳由 NW 向 SE 逐渐变薄 的变化趋势。蔚县地区位于怀安复式穹窿状褶皱隆 起带南部,莫霍面深度约为 42.5~43 km(图 3)(张 建狮等,1997;张德忠等,2013),在冀西北山区相对 较浅,为地热资源的形成提供了相对有利条件。



图 3 冀北地区莫霍面深度等值线图 (据张德忠等,2013 修改)

Fig. 3 The contour of Moho of northern Hebei Province (modified from Zhang Dezhong et al., 2013&)

2.1.2 大地热流分析

中国大陆地区热流值范围为 23~319 mW/m², 平均 61.5±13.9 mW/m²。前述山西地堑热流值 50 ~70 mW/m²,处于中游水平。张家口地区大地热流 值范围为 27~61 mW/m²,平均 46.75 mW/m²。蔚 县大地热流值范围在 57~61 mW/m²,平均 59.0 mW/m²(胡盛标等,2001),与中国大陆大地热流平 均值持平,为张家口地区大地热流背景相对高值区, 在山区属于较好的地温场反映。在没有特殊的附加 热源下,正常或偏高的区域大地热流背景,是中低温 地热系统最主要特征(汪集旸等,1993)。

2.1.3 地温梯度变化规律

蔚县煤矿区勘查资料(河北省煤田地质局第四地质队^{●●●●})显示,北阳庄等地的恒温带深度40~80 m,恒温带温度12.5℃左右,深度500~600 m以浅(主要为第四系和侏罗系)地温梯度为2.03~2.60℃/100 m,平均2.40℃/100 m。

卜南堡地热井,全井地温梯度变化区间为1.35 ~4.10 ℃/100 m,不同地层的地温梯度存在差异。 第四系和侏罗系地温梯度为4.10 ℃/100 m,奥陶系 和寒武系分别为1.35 ℃/100 m和2.43 ℃/100 m, 蓟县系雾迷山组为2.19 ℃/100 m(李亚震,2004;张 德忠等,2013)。

麦子疃地热井井底(2952 m)温度 52.5 ℃,井 深 500 m、1000 m、1500 m、2000 m 和 2500 m 的井温 分别为 26.4 ℃、30.9 ℃、34.8 ℃、38.8 ℃和 45 ℃。 0~1732 m 井段地温梯度 2.14 ℃/100 m;1732 m 至 井底地温梯度 1.26 ℃/100 m。

以上地温实测数据表明,本区地温梯度由第四 系和侏罗系的 2.40~4.10 ℃/100 m,奥陶系和寒武 系的 1.35~2.43 ℃/100 m,向下至蓟县系下降到 1.26~2.19 ℃/100 m,具有由上至下渐次降低的趋 势,这与岩层的导热性和含水性有关,山西地堑内 (不止于山西地堑)的很多盆地具有这种地热梯度 随深度不增反降的现象。这种情况说明,造成本区 地温提升的原因主要是上地幔传导热源,属于正常 的地热增温,而诸如岩浆活动之类的其他附加热源 处于次要地位,与区域大地热流背景是一致的。同 时也从另一个角度反映了深部长城系—蓟县系的富 水性是比较好的。

2.1.4 热源分析

地震探测资料显示,山西大同至蔚县一带的深部(上地壳上部)存在低速异常带(张建狮等, 1997)。麦子疃地热井继在深度2123 m 揭露到厚度 340 m 的潜流纹岩后,间隔272 m 长城系石英砂岩, 于2816 m 开始见到花岗闪长岩,直至孔底(未揭 穿)。据此,并综合区域内未发现喜马拉雅期大规 模岩浆岩体,仅有燕山期花岗岩类大面积分布,以及 地温场总体表现为山区正常偏高的水平来分析,该 地震波低速带应是燕山期(乃至更早)酸性岩浆岩 体的反映。由于岩浆活动时期早,年代久远,大部分 热量已经散失,仅是有限的岩浆岩余热和放射性热 对地温梯度提高有一定贡献,起到补充热源的作用。 所以,蔚县地区地热热源主要为上地幔传导热源。

2.2 构造的控热作用

如前所述,蔚县地区四周被不同时代的大断层 所围割。作为南界的蔚县南山断层,其北侧寒武 系—奥陶系灰岩含水层及长城系—蓟县系白云岩 (砂岩)含水层与断层南侧新太古界变质岩(相对隔 水层)对接,构成了蔚县南山断层南、北地下水的隔 水屏障。北界的阳原南山断层,其北侧缺失蓟县系, 第四系直接覆于长城系之上,除在蔚县盆地与阳原 盆地贯通的北水泉--澡洗堂-带,长城系--蓟县系 有部分连通外(图 2c),其余均为新太古界花岗片麻 岩与北侧的长城系和第四系含水层相遇,起阻水作 用(图 2a)。东界的松枝口—右所堡断层,为一新生 界掩盖下的隐伏断层,断距大,埋藏深,两侧水力联 系微弱,横向上具阻水性质,垂向可能起导水作用。 西界的大湾—暖泉断层,为一平移为主的正断层,大 湾以北段断距较小,两盘灰岩连接,地下水联系密 切。大湾以南段断距增大,属阻水为主的弱透水性 质,至暖泉一带因断层的阻水作用在两大断层的交 汇处,形成泉水溢出。总之,这些大断层基本隔阻了 蔚县"块断"内、外地下水的水力联系,使区内地下 水总体呈现为由北西向南东径流,并汇集赋存在壶 流河两岸及以南、蔚县南山断层以北,北东方向的条 形地带内(河北煤田地质勘探公司水文地质队♥:河 北省煤田地质局第四地质队[●];河北煤田地质勘探 公司第一勘探队[●]),为地下水的加热、升温形成热 储创造了有利条件。

上述四条大断层在阻隔盆地内、外地下水水力 联系的同时,由于在断层两侧,尤其是走向 NNW 的 松枝口—右所堡断层与阳原南山断层、壶流河断层 等 NE 向阻水断层的交汇处,次级构造较发育,岩石 破碎,为地下热水的上升和运移提供了通道。受水 位压差的影响,长城—蓟县系储层的热水,沿断层破 碎带上升并储存于浅部第四系砂砾石层、基岩上部 风化破碎带等地层中,形成二次热储,如阳原三马坊 澡洗堂地热田和北洗冀地热异常区。

澡洗堂地热田第四系下伏地层直接就是长城系 白云岩,经深部循环加热后的地下水,沿断层破碎带 可直接上升至第四系下部砾石层中汇聚,并形成二次热储。由于混合的低温地下水较少,所以地热井 揭露的热水温度可高达41℃。蔚县北洗冀一带,覆 盖在蓟县系白云岩之上的第四系等盖层厚度较薄, 仅400 m左右,经深循环升温的地下热水在上升过 程中,沿途不断与自身虽是热储层,但因埋藏较浅、 温度较低的蓟县系白云岩水混合,所以机井所揭露 的热水温度较低,仅30℃左右。蔚县暖泉温水的形 成机理不同于上述澡洗堂和北洗冀,系奥陶系灰岩 含水层水经地下自然增温加热后,在壶流河断层与 大湾—暖泉断层交汇处,沿断层破碎带上升至第四 纪泥河湾组砂砾石层中,并最终在水头压力作用下, 自流溢出地面形成的温泉。由于热储层为奥陶系, 埋藏相对较浅,所以水温仅20℃左右。

需要说明的是,由于澡洗堂地热田和北洗冀地 热异常区分别处于松枝口—右所堡断层与阳原南山 断层和壶流河断层的交汇地带,其形成与两组大断 层有直接关系,显示为带状热储的表象,所以会被有 些人认为是带状热储。但笔者等认为,相关断层的 断距虽然较大,但均在 1000 m 左右,未切割到地壳 深部,在导通深部热源方面发挥的作用有限,主要起 到了热水上升通道的作用。冀西北带状热储地热田 的水温往往较高,如赤城汤泉即为 68 ℃。而两地水 温均在 40 ℃左右,更符合本区长城系—蓟县系热储 层埋藏深度条件(详见后叙)。

2.3 盖层岩石组合及厚度变化特征

本区盖层主要为新生界第四系、古近系和中生 界侏罗系、白垩系,寒武系和奧陶系则属于相对盖 层。第四系在平川区皆有分布,上部岩性主要为马 兰期坡洪积、冲洪积黄土、亚黏土,含砂及卵砾石,下 部发育厚度不等的泥河湾组湖泊相黏土。新近系汉 诺坝组玄武岩仅局部分布。侏罗系主要出露于月山 向斜及北部山区,包括侏罗系中统下花园组砂泥岩 含煤地层、九龙山组凝灰质砂泥岩、髫髻山组中性火 山岩,上统后城组砾岩、砂砾岩。白垩系下统张家口 组酸性火山岩、凝灰质砂岩仅局部赋存。新生界和 中生界总厚度 500~2000 m 左右,沉积型岩石为主 (河北煤田地质勘探公司第一勘探队[®];河北省煤田 地质局第四地质队^{®-®})。这种地层热传导率低,热 阻大,有利于热能富集和保存,构成长城系—蓟县系 白云岩热储层的主要盖层。

奥陶系和寒武系大面积出露于蔚县北山(月山)和南山山区。寒武系上部为浅灰色泥质条带灰 岩和竹叶状灰岩,中部为鲕状灰岩、结晶灰岩,下部 为灰紫色泥质条带灰岩、紫红色页岩等。奥陶系仅 有下统发育,岩性上部为中厚层状白云质灰岩、石灰 岩,下部为褐黄色隐晶质灰岩、豹皮状灰岩夹薄层泥 灰岩。寒武系和奥陶系总厚度 200~800 m,在区域 上虽然也属于富水性中等的含水层,但由于寒武系 下部厚度较大的页岩的隔水作用,造成其与下伏长 城系—蓟县系含水层之间的水力联系不密切(河北 煤田地质勘探公司第一勘探队^{●,●};河北煤田地质 勘探公司水文地质队[●];河北省煤田地质局第四地 质队^{●-●}),客观上起到了相对保温的盖层作用,增 加了盖层的总厚度。

第四系自月山向斜南翼边缘开始向南逐渐增 厚,至壶流河两岸厚度最大,为600 m 左右。与之相 反,侏罗系在月山向斜轴部厚度最大,约1000 余米, 向南至壶流河北岸一带尖灭,壶流河以南,仅在本区 的东南部有残存。本区中南部第四系和侏罗系总厚 度 500~1200 m,并具有由北向南、自西向东逐渐增 厚的变化趋势。寒武系和奥陶系在陈家洼一带大部 剥蚀,南留庄、暖泉附近厚度大于 800 m,总体表现 为北厚南薄、西厚东薄的特点。

综合上述各时代不同地层的厚度变化及彼此互 为消长的关系,盖层总厚度介于 850~1200 m 之间, 厚度最大的区域为壶流河以南,壶流河以南是东部 大于西部。

2.4 热储层及地热流体温度估算

2.4.1 热储层特征

蓟县系和长城系岩性以白云岩类岩石为主,且 厚度巨大,埋藏深,为本区主要热储层。下伏地层为 新太古界桑干群变质岩,岩性主要有片麻岩、石英 岩、浅粒岩、角闪岩、大理岩、麻粒岩等,岩石致密,裂 隙不发育,含水性极弱,为相对隔水层。蓟县系包括 高于庄组、雾迷山组和铁岭组,岩性以巨厚层状白云 岩和燧石条带白云岩为主,厚度400~1050 m。长城 系仅有大红峪组发育,为一套滨海—浅海相沉积物, 岩性主要为白云质灰岩、泥岩、石英砂岩等,厚度大 于 800 m。其中的主要岩石白云岩,性脆易溶,利于 裂隙、溶孔溶洞形成,尤其在断层附近,岩石破碎、裂隙发育,砂岩中也具有孔隙。北部露头区直接接受 大气降水补给,在向南径流过程中也不断有来自于 上覆含水层水的补充,据抽水试验资料,单位涌水量 q>100 mL/(s・m),区域上是含水性中等—强的含 水层(河北煤田地质勘探公司第一勘探队^{④,}(河北 煤田地质勘探公司水文地质队^④;河北省煤田地质 局第四地质队^{⑤-⑥})。

蓟县系在月山向斜北翼和蔚县南山均有露头, 长城系主要在北山月山向斜北翼伴随蓟县系呈条带 状北东向出露。埋藏深度由北向南逐渐加深,至壶 流河以南其顶界埋深 1000 m 左右,按蓟县系和长城 系总厚度 2000 m 计算,底界埋深约 3000 m。

长城系—蓟县系热储层厚度巨大,不同层位的 岩溶裂隙(孔隙)发育程度存在差异,彼此之间连通 性差,层内温度一般浅部低于深部。麦子疃地热井 测温资料显示,1000 m 深度井温为 30 ℃左右,2950 m 深度在 50 ℃以上。

麦子疃和卜南堡地热井的热水即直接取自蓟县 系雾迷山组白云岩热储层,热水在水头压力作用下, 通过井筒上升至地层浅部甚至涌出地表。卜南堡地 热井所处位置在蔚县城附近的壶流河北岸,壶流河 断层附近。断层(或其次级断层)及其破碎带在将 热储层上下不同深度、不同温度含水层段导通,并且 其自身也是有效的储水空间,所以水井出水量较大, 达到 327.06 m³/h,同时水温也相对偏低,仅 38 ℃。 麦子疃地热井未揭露到大型断层构造,1738 m(井 温 37 ℃)以深有 8 个厚度 16.0~122.0 m 的岩溶裂 隙发育层段,所以出水量小于卜南堡地热井,但井口 出水温度较高,为42 ℃。

2.4.2 地热水化学类型

笔者等收集到卜南堡、麦子疃水井地热流体样 品水化学分析数据(黄树梅等,2018;河北省煤田地 质局第四地质队⁽¹⁾)(表 2)。按其主要组分 K⁺、 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃的物质的量百分比 含量投影到 Piper 三线图上(图4),以分析水化学分

表 2 蔚县盆地地热水样品分析结果(单位:mg/L)

Table 2 Analysis results (mg/L) of geothermal water samples in the Yuxian Basin

地热井	рН	温度 (℃)	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl⁻	SO4 ²⁻	CO3 ²⁻	F ⁻	NO ₃ -	HCO3-	可溶性 SiO ₂
卜南堡	7.77	41.8	1456.0	3.13	37.24	28.46	13.34	17.37	35.54	—	0.40	—	277.0	—
麦子疃	7.68	41.0	496.2	6.81	51.07	39.62	25.06	26.61	42.88	0.00	4.27	1.89	275.8	21.43



Fig. 4 The piper trilinear nomograph of geothermal water in the Yuxian Basin (the unit of the ions in figures is milligram equivalent per Litre)

布特征。

研究区地热流体样品 pH 值均大于 7,呈中偏弱酸性,地热水化学类型为 HCO_{3}^{-} —Na⁺·Mg²⁺·Ca²⁺型,为重碳酸盐型水。

2.4.3 水-岩作用程度

Giggenbach(1988)提出 Na—K—Mg 三角图解 法用于判断水—岩的平衡状态以及是否有浅层水的 混入,Na—K—Mg 三角图将地热水分为完全平衡、 部分平衡和未成熟水三种类型。将研究区地下热水 的 Na⁺、K⁺、Mg²⁺离子含量经转化后投影至 Na—K— Mg 三角平衡图解上(图 5),可看出区内地热水均落 在 Mg 角区域,属于未成熟水。说明研究区地热水 水—岩作用未达到平衡状态,地热水可能是由于浅 部地下水的混合,从而使地热水中的元素含量变低, 所以不宜用阳离子温标来估算热储温度,而适合用 SiO₂地热温标来估算热储温度。

2.4.4 热储温度估算

二氧化硅矿物广泛存在于岩石圈及水圈中,在 温度低于 300 ℃时,水中溶解的二氧化硅一般不受 其他离子或络合物影响,因此常用于地热温度的计 算。根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)及 Fournier 和 Potter(1982)提出的可计算无 蒸汽分离或混合作用下,且适用 20~330 ℃温度区 间的二氧化硅温标计算公式如下:

$$t/C = \frac{1309}{5.19 - \lg \left[\frac{\rho(SiO_2)}{mg/L} \right]} - 273.15$$
(1)
式中:t 为热储温度; $\rho(SiO_2)$ 为 SiO₂ 的质量浓度。

$$t/\mathbb{C} = \mathbb{C}_1 + \mathbb{C}_2[\rho(\operatorname{SiO}_2)/(\operatorname{mg/L})] + C_3[\rho(\operatorname{SiO}_2)/(\operatorname{mg/L})] + C_4[\rho(\operatorname{SiO}_2)/(\operatorname{mg/L})] + C_5 \lg [\rho(\operatorname{SiO}_2)/(\operatorname{mg/L})]$$
 (2)
中 $\rho(\operatorname{SiO}_2)$ 为 SiO, 的质量浓度: $\mathbb{C}_2 \sim \mathbb{C}_2$ 为常数

式中: $\rho(SiO_2)$ 为SiO₂的质量浓度; $C_1 \sim C_5$ 为常数 ($C_1 = -4.2198 \times 10, C_2 = 2.8831 \times 10^{-1}, C_3 = -3.6686 \times 10^{-4}, C_4 = 3.1665 \times 10^{-7}, C_5 = 7.7034 \times 10$)。

区内地热流体中可溶性 SiO₂ 质量浓度为 21.43 mg/L,利用式(1)(2)估算研究区热储温度分别为 66.0 ℃和 57.7 ℃,平均值为 61.9 ℃。

前文述及麦子疃地热井取水段深度范围为 1738~2953 m,浅部和深部含水层中的水混合,造成 井口热水温度相对较低,实测为 42 ℃,井底 2954 m 深度的实测温度为 52.5 ℃,与二氧化硅温标估算的 热储温度接近。

2.4.5 热储深度估算

研究区热储温度约为 61.9 ℃,恒温点温度为 12.5 ℃,恒温点深度 40~80 m。综合本区以往实测 地温梯度资料,确定本区 1000 m 以浅地温梯度为 2.3 ℃/100 m,1000~1732 m 地温梯度为 2.2 ℃/ 100 m,1732 m 以深地温梯度为 1.3 ℃/100 m。利 用地热水循环深度计算公式:



图 5 蔚县盆地地热水 Na—K—Mg 三角平衡图解 Fig. 5 Na—K—Mg triangular equilibrium of geothermal water in the Yuxian Basin

)

$$H = \frac{t_1 - t_0}{t_a} + h_0 \tag{3}$$

式中:H 为地热水循环深度(m); t_1 为热储温度(℃); t_0 为恒温点温度, h_0 为恒温点深度, t_g 为地温梯度。

计算得出,本区地热水循环深度约为3500 m。

3 地热资源成因模式和勘查方向

3.1 地热资源成因模式

蔚县盆地属于断陷盆地型层状热储低温地热 田。以阳原南山断层和蔚县南山断层为南、北边界 的蔚县地块呈一总体倾向 SE 的单斜构造(箕状构 造),蓟县系等地层埋藏深度由 NW 向 SE 逐渐加 深。盆地北部山区出露的长城系—蓟县系接受大气 降水后,顺层向深部运移,运移过程中不断有沿破碎 带、裂隙垂直下渗的相邻含水层水补给,蔚县南山断 层阻断地下水继续向南运移的路径。经过深循环的 地下水,被主要源于上地幔传导热热源加热后,半封 闭或封闭于长城系—蓟县系中形成层状热储。盖层 厚度较大的壶流河以南地区,特别是大型断层附近, 以及松枝口—右所堡等张性大断层与阳原南山断 层、蔚县南山断层等 NE 向阻水大断层的交汇部位, 次级断裂构造较发育,岩石破碎,利于地热流体的存 储和运移(图 6)。

3.2 地热资源勘查方向

壶流河以南地区,尤其是蔚县城以东区域热储

层埋藏最深,盖层厚,温度高,地热赋存条件最好,应 作为今后勘查、开发的重点区域。基于长城系—蓟 县系白云岩热储层厚度较大,不同深度的岩溶裂隙 体系与上覆含水层的联系程度有差异,理论上热水 温度随钻探深度加大而增高。水量大小则取决于地 热井所在位置热储层的岩溶裂隙发育程度,断层破 碎带附近水量会大于远离断层的地方。水位一般在 100 m 以浅(李亚震,2004;张德忠等,2013;河北煤 田地质勘探公司第一勘探队[®];河北煤田地质勘探 公司水文地质队[®];河北煤田地质勘探公司第四勘 探队^{®®})。

NNW 走向的深大断层——松枝口—右所堡断 层(包括白草窑—九宫口断层)与走向 NE 的蔚县南 山断层、壶流河断层、阳原南山断层等具有阻水性质 的大断层的交汇部位,如北洗冀一带、麦子疃以东 (包括阳原的三马坊)等地段,次级断裂发育,岩石 破碎,是热储赋存的有利地带。根据北洗冀地热井 揭露的多为二次热储层水,热水在上升过程中混合 了较多的低温地下水,温度普遍较低的现状,寻找地 热时宜先行开展物探工作,准确判断主断层的位置 和产状,然后钻探获取断裂深部温度较高的地热水。

4 结论

(1) 蔚县盆地属于断陷盆地型层状热储低温地 热田。热储层为长城系—蓟县系白云岩, 盖层主要 由第四系和侏罗系构成, 寒武系—奥陶系也起到了



图 6 蔚县盆地地热资源成因模式图

Fig. 6 Genetic pattern of geothermal resources in the Yuxian Basin

盖层的作用。热源主要来自上地幔传导热,深部岩 浆岩余热可能构成补充热源。

(2)受喜马拉雅期地壳拉伸作用影响,以阳原 南山断层和蔚县南山断层为南、北边界的蔚县地块 产生北升南降的掀斜作用,呈一总体倾向南东的单 斜构造(箕状构造),蓟县系和长城系等地层埋深由 北向南逐渐加深,至蔚县盆地南部处于最深部位。 北部山区出露的长城系和蓟县系接受大气降水后, 顺层向深部运移,运移过程中不断有沿破碎带、裂隙 垂直下渗的相邻含水层水补给,蔚县南山断层阻断 地下水进一步向南运移的路径。经过深循环的地下 水,受上地幔传导热热源加热后,半封闭或封闭于长 城一蓟县系白云岩岩溶裂隙等空间中形成层状热 储。理论地热水循环深度约为 3500 m,原始温度为 62 ℃。由于热储层厚度巨大,各层位的岩溶、裂隙 发育程度不同,彼此连通性差,所以随深度的增加水 温会不断提高。

(3)壶流河以南地区,尤其是蔚县城以东区域 热储层埋藏最深,是热储赋存前景较好的地段。阳 原南山断层、蔚县南山断层和松枝口—右所堡断层 等大断层,不仅阻隔了盆地内、外地下水的水力联 系,还为地下热水的上升提供了通道。这些大断层 两侧次级构造较发育,岩石破碎,既是地热流体上升 的通道,其自身也是储存空间,往往热储更加丰富。 甚至在水位压差作用下,热水沿大断层上升到浅部 地层,赋存于岩石孔隙、裂隙及断层破碎带中成为二 次热储。特别是在 NNW 向的松枝口—右所堡张性 大断层与 NE 向阳原南山断层、蔚县南山断层等阻 水大断层的交汇部位,如三马坊、麦子疃东、北洗冀 等地是次级断层比较发育的地方,应作为今后地热 资源勘查和开发利用的重点区域。钻井 1500 m 以 深,井口温度—般不低于 40 ℃。

致谢:本文在撰写过程中,中国地质科学院水文 地质环境地质研究所王贵玲研究员在蔚县盆地热储 类型、区内大断层与热储的关系等方面提出宝贵意 见,蔺文静正高级工程师提出了宝贵建议,一并表示 诚挚感谢。

注释 / Notes

- ●河北省煤田地质局第四地质队.2001. 张家口市经济区区域地热资源调查研究报告.
- ❷河北省地勘局第三地质大队. 2003. 河北省张家口市地热资源调查评价报告.
- ③河北煤田地质勘探公司第一勘探队. 1984. 河北省蔚县矿区东部 (31线以东)详查补充地质勘探报告.

 河北煤田地质勘探公司水文地质队. 1988. 河北省蔚县矿区供水 水源初步勘探报告.

●河北煤田地质勘探公司第四勘探队. 1982. 河北省蔚县矿区详查 地质勘探报告.

●河北煤田地质勘探公司第四勘探队,等. 1984. 1/5 万河北省蔚县 矿区区域水文地质测绘总结报告.

●河北省煤田地质局第四地质队. 2001.河北省蔚县煤矿区北阳庄 井田勘探地质报告.

③河北省煤田地质局第四地质队.2008.河北省蔚县矿区德胜庄井田煤炭勘探报告.

⑦河北省煤田地质局第四地质队.2010.河北省蔚县煤田陈家洼井田煤炭详查报告.

⑦河北省煤田地质局第四地质队. 2010. 河北省蔚县桃花区煤田预 查报告.

①河北省煤田地质局第四地质队. 2015. 河北省蔚县煤田德胜庄东 区煤炭预查报告.

河北省煤田地质局第四地质队.2016.河北省蔚县松枝口地热前 期调查可控源音频大地电磁法勘查报告.

⑧河北省煤田地质局第四地质队. 2017. 河北省蔚县北口区电法勘 探报告.

●河北省煤田地质局第四地质队.2017.河北省蔚县麦子疃—南杨 庄一带地热资源可控源音频大地电磁测深勘探报告.

⑤河北省煤田地质局第四地质队.2018.河北省蔚县柏树—赤崖堡 一带地热资源勘查可控源音频大地电磁测深勘探报告.

阿北省煤田地质局第四地质队. 2018. 河北蓝蔚风情旅游度假开 发有限公司地热1号井单井地热资源勘查报告.

伊开滦矿务局地质勘探队,长春地质学院. 1985. 蔚县矿区专门水 文地质勘探报告.

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)

- 陈墨香,汪集旸,邓孝. 1994. 中国地热资源——形成特点和潜力评估.北京:科学出版社:144~152.
- 陈晋镳,武铁山. 1997. 华北区区域地层. 武汉:中国地质大学出版 社.
- 郝星波. 2019. 蔚县盆地地下水赋存地质特征及开发利用前景探 讨. 地下水, 41(3):39~40.
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 河北省地矿局第三地质大队,张家口市国土资源局. 2013. 张家口 地质矿产. 北京:地质出版社.
- 胡圣标,何丽娟,汪集旸. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版). 地球物理学报,44(5):611~626.
- 黄树梅,李杨,林海苓. 2018. 张家口市地下热水地球化学特征及成因分析. 西部资源,(5):110,114.
- 李攻科,王卫星,李宏,杨峰田,王林海,房万嶺. 2014. 河北汤泉地 热田地温场分布及其控制因素研究. 中国地质,41(6):2099~ 2109.
- 李业震. 2004. 蔚县地热地质特征及地热资源开发利用. 中国煤田 地质,16(增刊):72~73.
- 汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和. 1993. 中低温对流型地热系统. 北京:科 学出版社.
- 徐世光,郭远生,等. 2009. 地热学基础. 北京:科学出版社.
- 张弼斌,黄克兴. 1988. 河北蔚县煤田控煤构造演化规律. 西安矿业 学院学报,8(1):30~38.

- 张德忠,刘志刚,卢红柳,等. 2013. 河北地热. 北京:地质出版社.
- 张建狮,祝治平,张先康,张成科,盖玉杰,聂文英. 1997. 山西高原 北部地壳上地幔地震波结构与深部构造. 地震地质,19(3):220 ~226.
- 赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化. 地质论评,36 (1):1~12.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理 委员会.2011.地热资源地质勘查规范(GB/T 11615-2010). 北京:中国标准出版社.

周江. 2019. 蔚县盆地地热成因分析. 煤炭科技,5(5):6~10.

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989#. Regional Geology of Tianjin, Beijing and Hebei Province. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1994 #. Characteristic and Esitmate of Geothermal Resources Potenital in China. Beijing: Science Press: 144~152.
- Chen Jinbiao, Wu Tieshan. 1997 #. Regional Stratigraphy of North China. Wuhan; China University of Geosciences Press.
- Foumier R O, Potter R W. 1982. A Revised and Expanded Silica Geothernorneter. Geothernal Resource Council Bulletin, 11(10): 3 ~12.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the Peoples Republic of China; China National Standardization Management Committee. 2011#. Geologic Exploration Standard of Geothermal Resources (GB/T11615-2010). Beijing: Geological Publishing House.
- Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria, derivation of Na— K—Mg—Ca Geoindicators. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52 (12):2749~2765.
- Hao Xingbo. 2019#. The occurrence characteristics of groundwater and utilization prospect in Yuxian Basin. Ground Water, 41(3): 39 ~ 40.

Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2001 &. Compilation of heat flow

data in the China continental area (3rd edition). Chinese Journal of Geophysics, $44(5):611 \sim 626$.

- Huang Shumei, Li Yang, Ling Hailing. 2018#. Gechemical charateristics and genesis of underground hot water in Zhangjiakou city. Western Resources, (5):110,114.
- Li Gongke, Wang Weixing, Li Hong, et al. 2014&. Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province. Geology in China,41(6):2099~2109.
- Li Yezhen. 2004&. Geothermal geologic features and geothermal resource exploitation in Yuxian. Goal Geology of China, 16(Supp): 72~73.
- The Third Geology Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Zhangjiakou Bureau of Land and Resources. 2013 #. Zhangjiakou Geology and Mineral Resources. Beijing: Geological Publishing House.
- Wang Jiyang, Xiong Liangping, Pang Zhonghe. 1993 #. Low—Medium Temperature Geothermal System of Convective Type. Beijing: Science Press, 1~207.
- Xu Shiguang, Guo Yuansheng, et al. 2009#. Geothermological Basis. Beijing; Science and Technology Publishing House.
- Zhang Bibin, Huang Kexing. 1988&. Evolution of the coal-controlling structure in Yuxian coalfield, Hebei provence, China . Journal of Xi'an Mining Institute, 8(1):30~38.
- Zhang Dezhong, Liu Zhigang, Lu Hongliu, et al. 2013 #. Hebei Geothermal. Beijing; Geological Publishing House.
- Zhang Jianshi, Zhu Zhiping, Zhang Xiankang, Zhang Chengke, Gai Yujie, Nie Wenying. 1997&. The seismic velocity structure of crust and upper mantle and deep structure feature in north Shanxi Plateau. Seismology and Geology, 19(3):220~226.
- Zhao Yue. 1990&. Mesozoic orgeny and tectonic evolution in Yanshan aera. Geological Review, 36(1):1~12.
- Zhou Jiang. 2019&. Analysis on geothermal genesis of Yuxian Basin. Coal Science Technology Magazine, 5(5):6~10.

The occurrence characteristics and exploration and development direction of geothermal resources in Yuxian Basin, northwest Hebei Province

LI Hongquan¹⁾, ZHANG Shusheng¹⁾, XIE Mingzhong²⁾, ZHOU Jiang¹⁾, ZHOU Jianfei¹⁾

JIA Lixin¹⁾, HAO Xingbo¹⁾, REN Jianshuai¹⁾, LIU Yongping¹⁾, YU Dandan²⁾

1) The Fourth Geological Team, Hebei Provincial Bureau of Coal Geology, Xuanhua, Hebei, 075100;

2) Environmental Gelolgical Survey Institute, Hebei Provincial Bureau of Coal Geology, Shijiazhuang, 050085

Abstract: The geothermal field in Yuxian area belongs to the type of faulted basin, which is a low-temperature geothermal field that is dominated by layered thermal reservoir. The heat source mainly comes from the heat transfer of upper mantle. The thermal reservoir is in the Mesoproterozoic Jixian System—Changcheng System, and the cap rock is mainly composed of Quaternary and Jurassic system. The Cambrian—Ordovician System also plays a role of cap rock. The Yuxian block, with Yangyuan Nanshan fault and Yuxian Nanshan fault as the south and north boundaries, presents a monoclinic structure with a general trend of southeast, and the burial depth of the Jixian System and the Changcheng System gradually deepens from north to south. The Changcheng System and Jixian System exposed in the northern mountain area of the basin received the atmospheric precipitation, and the water migrated to the deep along the layer. In the process of migration, there is water supply from the adjacent aquifers which infiltrate vertically along the fracture zone and fracture. The Yuxian Nanshan fault blocked the further

migration path of groundwater to the south. With the increase of buried depth, the groundwater is heated by the natural heating of the upper mantle heat source, and the groundwater is sealed or semi-sealed in the Changcheng System and the Jixian System to form conductive geothermal system. There are many secondary faults and fractures in the deep buried large faults and in the intersection of large faults which is conducive to the storage and migration of geothermal fluids. The south area of Huliuhe River, Sanmafang, Beixiji, the east area of Maimaituan, etc. have the above conditions and should be regarded as key areas for future exploration and development of geothermal resources.

Keyword: Changcheng System; Jixian System; conductive geothermal system; low-temperature geothermal field; Yuxian Basin

Acknowledgement: During the writing of this paper, Prof. WANG Guiling, from the Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of the Chinese Academy of Geological Sciences, has put forward valuable suggestions on the type of heat reservoir in the Yuxian Basin and the relationship between the large faults and the heat reservoir in the basin, and Dr. LIN Wenjing, a senior engineer has put forward valuable suggestions. We would like to express our sincere thanks

First author: LI Hongquan, a senior engineer, born in 1972, is mainly engaged in energy and mineral exploration management and technology research; Email:365237075@qq.com

Corresponding author: ZHANG Shusheng, a senior engineer (prof.), born in 1961, is mainly engaged in coal field geology and new energy mineral exploration and research: Email:zikzss.01@163.com

Manuscript received on: 2020-03-07; Accepted on: 2020-06-06; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview. 2020.04.010