

云南石林盆地地热田地热资源特征

姚明波¹, 刘红战^{1,2}, 陈康¹

(1. 云南岩土工程勘察设计研究院, 云南 昆明 650051; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 石林是国家地质公园, 位于滇东断陷盆地, 其地热研究是对云南断陷盆地地热研究的理论论证。论文通过对石林地热的热源、热田结构、水文地质特征、水化学特征进行研究, 地热类型为深循环层状地热田, 受九乡-石堰口断裂和牛头山古陆控制, 形成封闭的层状低温地热田。从水文地质条件看, 地下热水水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$, 偏硅酸含量较高。地热热储层埋藏深, 水温 $45 \sim 51^\circ\text{C}$, 地下热水具承压性, 宜于开采利用。但热田水补给资源有限, 且上部冷水丰富, 应控制地热水的开发利用。该研究成果对滇东其他岩溶断陷盆地地热开发有应用和参考价值。

关键词: 地热资源; 地热田结构; 热储层; 水化学特征; 开发利用; 石林盆地

中图分类号: P641.139

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)03-0189-04

Geothermal resources characteristics of Shilin basin geothermal field in Yunnan province

YAO Mingbo¹, Liu Hongzhan^{1,2}, CHEN Kang¹

(1. Yunnan Geotechnical Engineering Investigation Design Research Institute, Kunming 650051, China;

2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Shilin is a national geological park which is located in eastern Yunnan basin. The study on its geothermal is the theoretical demonstration of Yunnan rift basin geothermal. This paper studied the geothermal type, geothermal field structure, hydrogeological characteristics and water chemistry characteristics. The geothermal type belongs to deep cycle layered geothermal field and controlled by Jiyxiang-Shiyakou fault and Niutoushan ancient land so as to form the low temperature geothermal field of close layered. According to the hydrogeological conditions, the chemical type of geothermal water is $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ with high silicic acid content. As the geothermal reservoir is deeply buried, its water temperature is from 45 to 51 centigrade and with pressure-bearing, the underground hot water is suitable to exploit. While the resources supply is limited and the upper cold water is rich, the development and utilization of geothermal water should be controled. The result has application and reference value for the development of other eastern Yunnan karst rift basins.

Key words: geothermal resources; geothermal field structure; geothermal reservoir; water chemistry characteristic; development and utilization; Shilin basin

0 引言

由于地热资源分布的极不均匀性, 在开发利用中, 常以井采的方式在城镇区集中, 如北京市现有地热田 10 个, 约 400 多眼地热井^[1-2], 地下水的持续下降、温度降低等问题的产生, 会导致地热资源的枯竭。云南省是我国地热资源的主要分布省份, 著名的地热资源有腾冲火山地热^[3]、安宁的“天下第一汤”^[4-5], 云南省大地热流值总趋势是西部比东部高, 滇西腾冲火山带平均值高达 94 MW/m^2 , 滇东半数地区大地热流值低于 50 MW/m^2 , 但在断陷盆地

中热流值相对较高^[6]。石林盆地处于滇东断陷盆地, 是国家地质公园^[7], 也是云南省的主要旅游地, 石林地热的研究和开发将会对石林旅游经济发展有推动作用, 同时也是云南断陷盆地地热研究的理论补充及论证。

1 石林盆地地质背景

石林盆地为一断拗向斜盆地, 盆地呈南北向展布, 长约 22 km, 宽 5~8 km, 标高 1 694.0~1 820.0 m。四周山麓呈岩溶山地地形。总体地势为北高南低, 标高 1 694~2 015 m, 最高为西北部打野山, 高

程 2 015 m,最低点为盆地打石堂,高程 1 694.0 m。
从区域上看,本区出露地层齐全,从前震旦系至第四系均有出露,海相、陆相碳酸盐岩碎屑岩沉积,岩石类型、厚度及其交互组合形式,在时间和空间上有明显的差异和变化。石林区地层与区域上相比,主要地层为古生界地层,特别是大面积出露二叠系茅口组 (P₁m)、栖霞组 (P₁q) 和石炭系威宁组 (C₂w)、马平组 (C₂m) 地层,其下伏为古生界震旦系昆阳群地层,缺失了整个中生界地层,盆地内沉积新生界下第三系路南群 (E₂₋₃l) 地层。

石林地区所属区域位于纬向构造体系、经向构造体系的交汇部位,受纬向构造体系影响明显,主要构造形迹为北东向断裂,次为北东、北西向断裂,是小江大断裂的分支派生构造。入字型构造的九乡-石垭口断裂是石林盆地西部的控制断裂,断裂西盘出露志留系地层,东盘出露第三系和二叠系地层,断裂带中断层泥、糜棱岩、破裂岩明显,碎裂岩带宽 50~70 m,是地下水运移的有利地带。牛头山古陆为轴部走向北东 40°~50°复背斜,古陆西侧震旦系、寒武系地层与元古界牛头山组成不整合接触;古陆地带泥盆系、二叠系地层直接不整合于牛头山组上。

2 地热田结构

石林地热田基本以石林县城为中心,主要向北、东扩展,北起白沙坡,南至板桥,西起大鱼龙坝,东至石垭口,呈长方形,面积约 85.4 km²。
石林地热田垂向上看,元古界震旦系白云岩、白云质灰岩为热储岩层,呈层状。地热类型属深层岩溶裂隙层状传导型热储。

2.1 热源

(1) 地热异常。本区地热异常^[7]从两个方面反映,温泉和钻孔孔底温度。温泉反映的异常与本区气温进行对比,石林盆地气象资料显示,盆地常温层温度为 18.3℃,热显示的下限温度设定为 20℃,区内显示的自然热异常点有 10 个,均出露于路南群 (E₂₋₃l) 砂岩地层中,沿牛头山古陆边缘及隐伏断裂带发育,水温 20~23℃,流量 0.28~3.98 L/s,均为上升泉。分析泉水来源于深部含水层,沿断裂带和古陆隆起部位的裂隙出露地表。

1988-2003 年,石林盆地共有三个施工地热探孔,深度分别为 818.99、1 000、1 250 m,孔底温度各为 30.2、45、51℃,见表 1。

表 1 地热孔情况统计表 m, L/s, L/(s·m), °C

孔号	位置	孔口 标高	孔深	试验 层位	含水 厚层	静止 水位	降深	涌水量	单位 涌水量	水温
RK1(TK5)	石林岔路口	1775.30	818.99	P ₁ q-D ₂ q	510.51	10.80	30.69	10.54	0.343	29.0
RK2(TK4)	石林县东门	1679.25	1000.00	P ₁ q、C ₃ m、C ₂ w、 C ₁ ds、Z ₂ dn	237.84	0.50	38.90	2.76	0.071	29.0
RK3	石林县东门	1678.32	1207.00	Z ₂ dn	188.00	+6.30	0	7.73		46.0
							13.90	9.38	0.675	

(2) 热源。地热水通常可分为有附加热源和无附加热源,钻孔和测井资料显示,盆地内地层主要为碎屑岩和碳酸盐岩,不存在岩浆岩侵入等附加热源。
根据钻孔 RK1、RK2、RK3 钻孔资料,地温梯度为每 100 m 增加 1.5~4.8℃,其中碎屑岩地温梯度为每 100 m 增加 3.33~4.8℃;碳酸盐岩地温梯度为每 100 m 增加 1.5~2.89℃,小于自然增温率每 100 m 增 3.0℃,不同岩性段地温梯度及物理测试结果见表 2,由表 2 可见碳酸盐岩热扩散率较高,地温梯度较低;碎屑岩热扩散率较低,地温梯度较高,同时地温梯度还随地层的埋深和富水性及地热水文地质条件而变化。
由此判断,热水形成主要依靠深部软流圈在地壳纵向上产生的正常地热增温,属于深循环成因。

表 2 岩石热物理参数表 W/(m·K), J/(kg·K), °C

地层	岩性	热导率		比热		钻孔测 温梯度
		值域	平均	值域	平均	
E ₂₋₃ l	砂岩	2.226	2.09	937.634	958.359	3.33
	泥岩	1.9546		979.418		
P ₁ m	补斑灰岩	3.545	3.925	884.000	887.183	1.50
P ₁ q	白云质灰岩	4.153		932.610		
C ₃ m	灰岩	4.075		884.603		
ε ₁ c	砂岩	3.594	3.023	887.183	873.185	4.80
ε ₁ q	泥岩	3.611		856.201		
ε ₁ y	粉砂岩	2.530		851.595		
	粉砂岩	2.359		899.785		
Z ₂ dn	灰岩	3.080	4.462	857.759	841.672	2.74
	硅质白云岩	4.374		738.970		
	白云岩	5.931		928.297		

注:温度递度为每 100m 增温,℃。

2.2 热田垂向结构

石林地热田地表及浅层分布新生界松散层,其下为古生界碳酸盐岩冷水含水层,再下以寒武系泥岩、砂岩为隔热隔水盖层,Z₂dn 白云岩为热储层,组成一个完成热储结构。热储埋深 2 000 m 以内,温度大于 40℃ 的范围称为石林热田。热田垂向结构层可分为 4 层,见图 1。

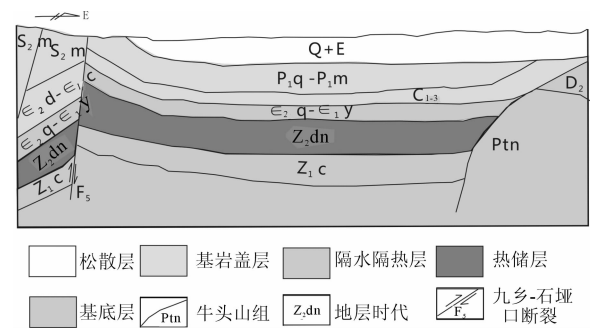


图 1 石林地热模型图

- (1) 新生界松散堆积构造层。该层为下第三系路南组(E₂₋₃l)砂质页岩、泥质粉砂岩、砾岩,电测深资料显示,该层由盆地四周向中心厚度逐渐增厚,最大厚度大于 600 m。该层透水性差,热扩散率低,地温梯度较高,平均每 100 m 增加 3.33℃,能有效阻隔下部热量扩散,是良好的隔热保温层。
- (2) 古生界碳酸盐岩冷水强循环构造层。该层主要为古生界二叠系、石炭系碳酸盐岩,分布广泛,出露面积大,钻孔揭露厚度 484.66 m 和 494.0 m,岩溶发育强烈,与地表水联系较直接,地下水循环交替强烈,水温小于 20℃,有随深度加大温度增高之势,碳酸盐岩平均热导率 3.925 W/(m·K)。该层为对流循环系统,热扩散率较高,地热梯度仅为每 100 m 增加 1.5℃,属富水性强的冷水含水层。
- (3) 寒武系泥岩、砂岩相对隔水构造层。该层主要为下古生界地层 E₁q、E₁y 泥岩、砂岩组成,弱含水层,透水性差,钻孔揭露厚度 196.8 ~ 23.3 m,埋藏深,热导率平均 3.023 W/(m·K),地温梯度每 100 m 增加 4.8℃,在断陷盆地中,形成热储层的直接隔热、隔水盖层。
- (4) 碳酸盐岩热水弱循环构造层。该层由灯影组(Z₂dn)灰岩、硅质白云岩岩溶含水层,构造裂隙发育构成储水空间,富水性、透水性强,热导率 4.462 W/(m·K),地温梯度每 100 m 增加 2.74℃,是热田主要热储层。

2.3 构造通道

该地热田西侧边界为九乡-石埂口断裂,该断

裂规模较大,垂向切穿了各地层,形成地下水深循环和热对流,是地下水良好的储集场所及地下水运移通道。

2.4 热田水文地质条件

地热田储热层 Z₂dn 地层在石林盆地周围没有广泛出露,仅北部小面积露头,且被断裂阻隔,地热田的水源补给主要是上覆含水层通过断裂破碎带、古陆接触带越流补给与北、西侧侧向径流补给,向盆地中部径流富集,以上升泉形式向地表排泄,总体流向由北向南。地下水在缓慢的流动过程中,岩溶水不断吸收周围岩体的热量,依靠正常的地热增温对岩溶水进行加热,巨厚的盖层起到了重要的保温隔热作用。岩溶水处于良好的封闭环境中,径流速度缓慢,且径流路径长,保证了岩溶水有充足的时间接受传导热流,水温因此增高。

2.5 热田水化学特征

地下热水水化学特征反映了地下热水同周围围岩及径流过程中围岩间的溶解与溶滤作用,地热田地下热水, pH 值 7.47, 主要离子含量: Ca²⁺ 58.25 mg/L, HCO₃⁻ 289.24 mg/L, 总硬度 219.09 mg/L, HSiO₃⁻ 32.67 mg/L, 地热水水化学成分较为复杂, 总体水平方向上水化学组分变化小。按水化学类型定名为 HCO₃-Ca 型水, 具中性, 硬度偏高等特征; 偏硅酸含量较高, 超过国家矿泉水限量标准 (25 mg/L), 属偏硅酸矿泉水, 见表 3。

对比邻区宜良、汤池的温泉水化学特征, Ca²⁺、HCO₃ 的极端高浓度说明石林地热田的热水在径流过程中不断溶解盖层及热储层中的碳酸盐岩, 进一步反映了热水的径流途径。

物理性质		化学性质				mg/L	
		阳离子 含量		阴离子 含量		其它	含量
颜色	无	K ⁺	4.69	HCO ₃ ⁻	289.24	总硬度	219.09
色度	20.0	Na ⁺	10.24	CO ₃ ²⁻	0.00	总碱度	237.25
透明度		Ca ⁺	58.24	Cl ⁻	1.06	固形物	
混浊度	<3	Mg ⁺	17.89	SO ₄ ²⁻	10.60	可溶性 SiO ₂	25.13
沉淀物	少许黄色沉淀	NH ₄ ⁺	0.13	F ⁻	0.24	游离 CO ₂	6.17
气味	无	Fe	2.82	NO ₃ ⁻	0.31	永久硬度	0.00
气温	21℃			NO ₂ ⁻	0.006	暂时硬度	219.09
水温	45℃	Li	0.008	PO ₄ ³⁻	0.05	负硬度	18.16
pH 值	7.47	Sr	0.004	COD _{Mn}		HSiO ₃ ⁻	32.67

3 地热资源开发利用分析

3.1 地热资源评价

热储资源评价是地热可持续开发利用的基础,地热开采过量,会造成地下水位急剧下降,热储的生产能力下降,地下水温下降等问题,石林地热田热储层呈封闭状态,上升温泉是其主要排泄方式,目前未进行大规模的开采,从现有的中地温地热田地热资源计算方法比较^[8],选用热储法进行计算,热储法不考虑地热水的动态变化,为零维计算模型。

热储量计算评价范围是整个石林盆地地热田,以九乡-石垭口断裂和牛头山古陆为边界,面积 85.4 km²。计算石林盆地地热资源量为 2.03×10^{18} J,折合标准煤 0.693 亿 t。

3.2 开发利用分析

石林盆地地热田热储层埋深呈由北往南加大,盖厚亦同时增厚,石林县城区处于盆地中段,该地段热储层为 Z₂dn 白云岩,富水性强,钻孔揭露热储层埋深 992.84 ~ 1 019.0 m,平均厚度 386.0 m,热储层埋深小于 2 000 m,便于开采;热储温度 45 ~ 54.29℃,井口水温 45℃,平均 49.65℃,水温大于 40℃,具有开采价值,且热水温度呈由东向西增大趋势,于九乡-石垭口断裂附近,预测水温达 50℃ 以上;地下热水具较强的承压性,揭露承压水头达 ± 6.3 m,自流量 7.73 L/s,便于开采利用;故将大鱼龙坝、路美邑至大屯圈定为具较好的开采条件和开采利用价值地段。

热田热储层埋藏深,盖层厚度大,且物理力学性质较好,开采深部地下热水不会产生地面沉陷、岩溶塌陷的环境地质问题;但热储层上覆冷水含水层厚 490 m,富含岩溶水,地热开采井穿越段易产生冷水渗入,降低地下热水水温,降低开采利用价值,在开采过量时,大量上部冷水补给,改变地热田水文地质条件,水动力条件加强,地下热水温降低,使热水井转变为冷水井。

盆地内大鱼龙坝-大屯以东,属牛头山古陆下卧地段,钻孔显示,孔底温度 30.2℃,往深处温度呈升高趋势,虽具一定地热,但昆阳群牛头山组(P_{tn})为一套石英砂岩,粉-细砂岩碎屑岩地层,富水性差,涌水量小,为有热无水地段,且水温较低,不具利用价值。

石林地热田属小型低温地热田,地热田流体补给仅断裂带渗流和北、西两侧地下岩溶水部侧向补给,地下水补给有限。在地热田资源虽属可再生资源,过量开采势必导致地热田区域地下水位下降,加速整个水文地质单元内水循环,造成地热田水温降低。

4 结 语

(1)石林地热田热储层为元古界震旦系白云岩、白云质灰岩,上覆新生界及古生界碎屑岩为隔热盖层,九乡-石垭口断裂为导热导水断裂,控制着地热田的地温场特征,平均地温梯度为:碎屑岩地温梯度为每 100 m 增加 3.33 ~ 4.8℃;碳酸盐岩地温梯度为每 100 m 增加 1.5 ~ 2.89℃

(2)地下热水类型为 HCO₃-Ca 型水,具中性,硬度偏高,属偏硅酸矿泉水。

(3)石林地热田为九乡-石垭口断裂和牛头山古陆挟持的狭长型地热田,地热资源量为 2.03×10^{18} J,折合标准煤 0.693 亿 t。热储层埋深 992.84 ~ 1019.0 m,水温 45 ~ 51℃,地下热水具承压性,为盆地内热储条件较好,宜于开采利用。

(4)石林地热为低温小型地热田,地下热水补给有限,上部冷水丰富,过量开采,会使地热田丧失热水效应,应控制热水开采。

参考文献:

- [1] 孙颖,刘久荣,韩征,等.北京市地热资源开发利用状况[J].安徽农业科学,2009,37(16):7564-7566.
- [2] 何柏林.北京城区地热田西北部地热地质特征[J].现代地质,2009,23(1):49-56.
- [3] 赵慈平,冉华,陈坤华.由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存研究[J].岩石学报,2006,22(6):1517-1528.
- [4] 杨金和,高俊彩.安宁温泉地热区地热地质特征分析与研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2008,33(5):1-6.
- [5] 程先锋,徐世光,张世涛.云南省安宁温泉地热地质特征及成因模式[J].水文地质工程地质,2008,35(5):124-128.
- [6] 徐世光,郭远生.地热学基础[M].北京:科学出版社,2009.
- [7] 李玉辉,杨一光,梁永宁,等.云南石林岩溶发育的古环境研究[J].中国岩溶,2001,20(2):91-95.
- [8] 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.