第 35	5卷	第	2 期	
20	16 年	4	月	

王 宇,康晓波,张 华,等.昆明地热田的成因与外延[J].中国岩溶,2016,35(2):125-133. DOI:10.11932/karst20160201

昆明地热田的成因与外延

王 宇¹,康晓波²,张 华²,王 燕³

(1.云南省地质调查局,云南 昆明 650051;2.云南省地质环境监测院,云南 昆明 650216;
3.云南省地质调查院,云南 昆明 650216)

摘 要:在昆明地热田外围万溪冲成功钻探深度 2 001.6 m,井口水温 55 ℃,涌水量 1 230 m³/d 的探采结合 井。通过此次钻探研究验证了对云南省层状热储形成规律的认识,一是在碳酸盐岩地层埋深足够大,按地温 梯度推算碳酸盐岩热储层温度达到 45 ℃以上的地段,均具有钻凿可利用的地热水井的地热地质条件,尤其是 在断陷盆地中;二是震旦系上统灯影组和下寒武统渔户村组碳酸盐岩地层分布稳定,其中的不整合面、断裂构 造是深层承压水传输的通道,形成了地热水深远程径流,导致了深岩溶发育,因此是普遍存在的地热水储层。 根据以上认识和本次勘探取得的新突破,结合研究区的地质、水文地质资料进行分析推断,将昆明地热田东南 边界由呈贡吴家营附近向南推进至晋城镇南边,外延 20 余 km。 关键词:地热;勘探孔;地层;地质构造;深远程径流

大键问:地热;胡採扎;地层;地质构造;床边住住流

中图分类号:P314 文献标识码:A 文章编号:1001-4810(2016)02-0125-09

为了进一步勘查昆明地区的地热资源潜力,为城 市化发展服务,在云南省整装勘查资金中立项开展昆 明市呈贡新区地热资源勘查评价。在1:1万水文地 质调查和物探工作的基础上,经过充分论证,在昆明 地热田外围的万溪冲布置勘探孔,于 2013 年 1 月打 成了深 2 001.6 m,井口水温 55 ℃,涌水量 1 230 m³/d的探采结合井。基于本次勘查评价工作成果, 结合地热田的成因及地热水赋存规律研究以及昆明 断陷盆地的地热地质条件,外延扩展昆明地热田边 界,评价地热资源潜力,从而达到扩大地热资源勘探 远景区之目的。

1 以往勘探状况

研究昆明地热田的成因及地热水赋存规律,推测 外延地热田边界,扩大地热勘探远景区,首先需对昆 明地热田以往的勘探工作及认识有所了解。昆明地 热田属低温层状热储,处于昆明断陷盆地内。昆明地 热田自70年代初起,由云南省地矿局第一水文地质 工程地质大队先后做过3次调查研究:①70年代初 至80年代中期,经过资料收集和综合研究圈定了地 热异常区范围;②1982-1985年开展了"昆明地区滇 池流域地热调查",初步圈定了昆明地热田边界;③ 1987-1989年开展的"昆明地热田进一步研究及外 围普查",扩展了昆明地热田边界。

昆明地热田边界圈定的主要原则为:①平均地温 梯度≥2.5℃/100m;②热储层埋深≤2000m,地热 水温度≥40℃;③在满足上述条件的前提下,由实测 资料、物探资料和地热地质条件分析,以具有控热作 用的断裂为地热田边界划分依据,不考虑滇池水域。 根据上述原则,1989年最后圈定的地热田边界基本 上与2.5℃/100m地温梯度等值线吻合,具体划定 为:北以盆地北缘 NEE 向断裂及2.5℃/100m地温 梯度等值线为界;西以普渡河一西山断裂为边界,同 时也考虑西侧地热钻探显示和地形条件适当跨越断 裂;东以白邑一横冲断裂为界;南以吴家营南边的

基金项目:云南省整装勘查资金项目 2012 年计划

第一作者简介:王宇(1960-),男,博士,教授级高工,主要从事水文、工程、环境地质研究。E-mail:ynddywy@163.com。 收稿日期:2016-02-15

NEE 向断裂为界,面积 354.06 km²(图 1)。



图 1 昆明地热田 1989 年所划边界

Fig. 1 Previous boundary of Kunming geothermal field(1989)

昆明地热田在水平面上较强增温区带分布与断 裂带和基底凹陷区展布相吻合,显示地热异常受断裂 构造的控制,并与热储层埋深直接相关。近盆地边缘 相对上升的山区,地热增温梯度减小,显示了热储层 接近裸露山区后由封闭状态向半封闭或开放状态过 渡,地表水和浅层地下冷水渗流循环增强,上覆盖层 封闭保温功能变差。

2 热储成因分析

通过区域地质调查、地质历史研究、新构造运动 特征分析,我们认识到扬子准地台普遍存在形成层状 热储的地热地质条件。云南的扬子区具有典型的基 底和盖层双层结构。基底岩系包括古元古界复理石 和钠质火山岩建造,厚逾万米,可能经过吕梁运动后 形成结晶基底;中元古界厚达9000~11000 m,为复 理石和碳酸盐建造,经晋宁运动全面褶皱回返,形成 扬子地台的褶皱基底;新元古界至中三叠统为盖层沉

积[1]。盖层底部的下震旦统磨拉石建造,局部含中基 性、中酸性火山岩,上震旦统下部南沱组冰碛层、陡山 沱组滨海—浅海相砂泥质碳酸盐岩建造,对褶皱基底 起到了填平补齐的作用。由此形成了平缓的浅海相 沉积环境,沉积了上震旦统上部灯影组(Z₂dn)和下 寒武统渔户村组($\in_1 y$)硅质碳酸盐岩、含磷硅质碳酸 盐岩地层[2],分布广泛,厚度稳定,是普遍存在的地热 水储积层。寒武系一中三叠统间多有沉积间断,但均 为假整合,盖层完整,主要由砂泥质建造、碳酸盐建 造、含煤建造以及基性火山岩建造相间组成,完整厚 度达万米以上。底部下寒武统筇竹寺组、沧浪铺组碎 屑岩层为灯影组、渔户村组热储层的第一隔水隔热层 (表1)。所以,扬子准地台从地质结构看,总体上就 是一个主要以灯影组、渔户村组为热储层,部分区域 下古生界碳酸盐岩或硬质砂岩层也常形成热储层,上 下有厚大隔水、弱导热地层的巨大层状热储。其中的 不整合面、断裂构造是地热水深远程径流的通道,也 是深埋藏碳酸盐岩地层岩溶发育的地质因素[3]。地 热水在高原深切割地形高差产生的静水压力作用下, 沿着这些通道产生受迫对流,在低洼的河谷或盆地 内,沿着陡倾斜的导水断裂或热储层运移上升,出露 地表形成温(热)泉或隐伏的热储层(带)。据昆明盆 地地下水氢、氧同位素统计(表 2),昆明盆地地热水 的 ôD 值变化范围很小,并且 ôD 值明显低于当地地 表水或地下水,表明这些热水是由距离远、地势高的 山区降水或地下水补给的。据氚同位素年龄计算,昆 明地热田深部储热层地热水形成年龄为40~50 年[4]。

昆明地热田所属地层区为扬子区康滇分区昆明 小区,地层层序稳定^[5]。据实测地层剖面及钻孔资料 综合整理,灯影组、渔户村组热储层碳酸盐岩层具有 硬、脆、碎的特点,富水性、透水性均匀,上覆隔水、弱 导热的古生界泥质岩层,下伏震旦系上、下统及昆阳 群砂泥质变质岩透水性、导热性弱,均具有足够的厚 度[7](表 3),具备形成层状热储的含水层组条件,昆 明地热田热储结构的热储层、隔水保温盖层及底板、 断裂导热通道等要素完整(图 2、3),各热储结构分层 的地温梯度层间差异明显(表 4),弱透水、弱导热层 地温梯度高,强含水层由于水热传导通畅,地温梯度 普遍低。在昆明地热田南西海埂地热块段,由于地质 历史时期古地表侵蚀作用强烈,使得灯影组、渔户村 组热储层在部分地段直接与上覆新生界松散盖层不 整合接触,钻孔揭露的覆盖层最大厚度为1160 m。 新生界松散盖层为河湖相沉积的粘性土层、淤泥质土

	热储结构层及岩性			密度 /g/cm ³	孔隙度 /%	渗透系数 /m/d	比热容 /J/(kg・℃)	热导率 /W/(m・K)	地温梯度 /℃/100m
	Q-N	粘性土	9.78	1.95	26.76	0.090	979.20	0.981 8	5.01
		砂岩	0.55	2.45	2.225 6	0.011	937.634	2.225 6	
	E	泥岩	3.57	2.19	1.955 5	0.001	979.418	1.955 5	
盖		灰岩	0.025	2.68	4.114 3	3.525	872.293	4.114 3	1.00
	$P-D_3zg$	白云质灰岩	0.04	2.65	4.153 4	1.233	932.610	4.1534	1.00
层		白云岩	0.12	2.67	4.544 2	0.789	930.223	4.544 2	1.00
	$\in {}_1c$	砂岩	0.41	2.41	3.593 9	0.128	887.183	3.593 9	3.89
	$\in {}_{1q}$	泥岩	0.63	2.22	3.611 4	0.002	856.201	3.611 4	3.64
	$\in {}_1 y$	泥质粉砂岩	0.34	2.41	2.444 3	0.010	875.690	2.444 3	4.96
热储层	$Z_2 dn$	硅质白云岩	0.04	2.80	2.33	1.89	842.307	5.076 3	3.45
基底	$\operatorname{Pt}_2 d$	板岩		2.31	3.00	0.012	879.288		

表1 滇东地区岩石基本参数表

Table 1 Main physical and thermodynamic parameters of rocks in Eastern Yunnan

表 2 昆明盆地地表水和地下水氢氧同位素区间值统计表

Table 2 Period statistics of H and O isotope of surface water and ground water in Kunming basin

-¥<- III		取样点数	$\delta^{18}O/\%$	60	δD/%0	$\delta D/\%_0$		
	失望	/个	一般值	一般值 平均值		平均值		
	雨水	3	$-2.89 \sim -1.47$	-2.29	$-0.92 \sim 57.49$	22.29		
:	地表水	8	-10.65~-4.49	-9.12	$-38.26 \sim 27.57$	-15.05		
:	地下水	20	$-13.83 \sim -11.23$	-12.38	$-78.66 \sim 3.25$	-38.97		
热	断裂带型	2	$-12.48 \sim -12.36$	-12.42	$-58.61 \sim -44.13$	-51.37		
水	层控型	5	$-13.8 \sim -12.9$	-13.52	$-102 \sim -93$	-99.8		

表 3 昆明地热田热储地层简表[6]

Table 3 Strata profile of the geothermal reservoir in Kunming geothermal field

地层	名称	地层代号	厚度/m	岩性特征
沧浪	二段	$\in {}_1c^2$	61.10~115.00	泥(页)岩夹砂岩——粉砂质泥岩、含云母碎片页岩夹泥质粉砂岩
铺组	一段	$\in {}_1c^1$	59.60~155.00	石英砂岩夹泥(页)岩——石英杂砂岩,含长石石英砂岩夹泥岩、页岩
筇竹	寺组	$\in {}_1q$	88.10~221.30	泥(页)岩夹砂岩——泥岩、含粉砂质钙质泥岩夹钙质粉砂岩,底部为炭质泥岩、页岩
渔	三段	$\in {}_1y^3$	9.10~100.30	含磷粉砂岩夹页岩——含磷泥质石英粉砂岩夹粉砂质页岩,底部有海绿石砂岩和黑色页岩
户	一印	C2	E2 E0 ~ 250 20	含磷白云岩——泥至细晶白云岩,含磷白云岩、白云质、硅质磷块岩夹硅质(或燧石)条带或条
村	段	$\in {}_1 \mathcal{Y}^s$	53.50~250.20	纹
组	一段	$\in {}_1y^1$	3.22~36.96	页岩夹砂岩——白云质页岩夹石英粉砂岩、海绿石粉细砂岩,底部泥质白云岩
灯影	彭组	$Z_2 dn$	315.80~376.50	硅质白云岩——硅质白云岩泥—粉晶白云岩夹致密状纯灰岩
陡山	沱组	$Z_2 d$	65.00~151.20	白云岩夹石英砂岩——上部中细粒石英砂岩、粉砂质白云岩;中部泥—粉晶灰岩及白云岩; 下部粗粒含长石石英砂岩夹白云质砂岩
南洋	它组	$Z_2 n$	24.48	砂岩、页岩和砾岩——顶部滨湖浅滩相细粒岩屑砂岩夹含云母质页岩;上部冰水湖相页岩, 下部冰碛砾岩
澄江	T.组	$Z_1 c$	294.80~364.50	砂岩夹细砾岩——细一粗粒岩屑杂砂岩夹岩屑石英砂岩及层间细砾岩
柳坝	塘组	Pt_2lb	186.70~245.80	板岩夹粉砂岩——板岩、粉砂质板岩、炭质板岩夹硅质板岩、粉砂岩等,具底砾岩夹铁矿层

表 4 昆明热田热储结构层地温梯度 (单位:℃/100m)									
Table 4 Geothermal gradients of structural layers of the geothermal reservoir in Kunming geothermal field									
结构分层 新生界松 上古生界冷 散覆盖层 水强循环层					下古生界相对隔水隔热层				
地层	Q-N	$P_2\beta$	$\mathbf{P}_1 m - \mathbf{D}_2 h$	$\in {}_2d$	$\in {}_1l$	$\in {}_1c$	$\in {}_1q$	$\in {}_1y^3$	$\in_1 y^2 - Z_2 dn$
平均值	5.01	0.5	1.0	2.67	2.18	3.98	3.6	4.96	3.45
最高值	8.25		5.27			8.26	7.34	8.27	



图 2 研究区域基底构造

Fig. 2 Basement structure map of the study area



Fig. 3 Sketch map of the geothermal reservoir in Kunming geothermal field

层与砂性土、砾石和卵石层互层,隔水、隔热性能好。 1999年4月19日20时,作者主持的昆明海埂红塔 体育中心地热钻井,在新生界松散层中钻进至深度 282m时突发天然气井喷,天然气成分主要为甲烷 (CH₄),占比76.75%~97.81%,井喷压力根据压井 泥浆重度和井内浆液柱体高度估算为3.5MPa,井喷 延时12小时8分钟被压住,随之下套管和灌注水泥 浆封闭了储气层。此前在昆明盆地所作各类油气调 查工作均未发现气苗,此次井喷表明新生界盖层封闭 非常严密,也是性能优良的热储盖层。

昆明地区为小江断裂及普渡河断裂等活动断裂 所挟持,新构造运动强烈,形成了著名的小江地震带, 沿断裂水热活动较强烈,天然出露有安宁温泉、汤池 温泉、北鱼口温泉等,已打地热水勘探及开采井120 余口。为了探索扩大地热田范围,结合供水需求,本 次钻探靶区选择在原先所划地热田之外的呈贡万溪 冲地段。该地段为南北向的白邑—横冲断裂影响带 (图 2),属小江断裂的次级断裂,断裂南段断面近于 直立,视倾角约 80°,为高倾角张性断裂,是昆明盆地 东部控制边界,地貌反映清晰,表现为线状槽谷、断阶 台地^[8]。自更新世以来持续活动^[9],1937年11月10 日曾发生过 5 级地震。因此,在万溪冲地段存在成为 导热、导水通道的活动断裂背景,有条件形成地热水 深远程径流。

昆明地热田的地热水开采井,除了个别位于盆地 边缘的开采井,基本都是开采灯影组、渔户村组热储 层。勘探实践证明,由灯影组、渔户村组构成的层状 热储,不受地表水、浅循环地下水流域边界和排泄基 准的控制,受控于深大断裂及高原盆地地热水水位与 深切谷底间逾千米以上的高差,只要具备足够厚的盖 层,靠近活动断裂,就能形成可供开发利用的热储,尤 其是在构造运动强烈的断陷盆地中。

3 外围钻探试验

昆明盆地的东南部是昆明城市发展规划的主要 拓展区,呈贡新城区已初具规模,昆明市政府已迁入 多年,但地热资源尚未作过深部勘探。根据前述热储 成因分析结论,对照昆明盆地东南部的地热地质条 件,经过分析评估,确认该区具备形成层状热储的所 需条件。因此决定跨越昆明地热田原南部边界,开展 外围地热钻探试验,为外延扩展昆明地热田边界,扩 大地热资源勘探远景区提供确切依据。

3.1 孔位选择

在布置钻孔时,首先综合论证盆地地质、水文地 质、地热地质条件,重点是地层层序、构造组合、碳酸 盐岩地层的埋藏分布情况,比拟分析地温梯度值、深 埋藏型岩溶含水层的富水性及温度,综合评价圈定钻 探地热水的"靶区";再深入分析具体地段的构造特 征、寻找断裂与岩溶含水层的有利组合部位,评价地 热水开发技术条件;然后辅以多个拟选井位的物探工 作,最终比较优选井位^[10]。

(1)地质分析

万溪冲靶区内地表出露石炭系地层,根据昆明地 区实测地层剖面及钻探资料推测,灯影组(Z₂dn)、渔 户村组(∈₁y)岩溶裂隙含水层埋深大于1000 m;根 据当地的水文地质钻孔测温,覆盖型岩溶地下水温度 偏高,在22℃左右波动^[11],估计地温梯度可以达到 昆明地区的常见值3℃/100m。以当地平均气温15 ℃为基准推算,设计深度2000 m的钻孔,可望获得 可供沐浴利用的水温45℃以上的地热水。

(2)物探验证

本次采用大地电磁频谱探测(MES),在拟选靶 区长宽各 500 m×500 m 范围内布置测点 6 个(图 4)。电磁频谱的场源是太阳风或太阳黑子活动及闪 电雷击。各种地层具有不同的物理性质,形成了不同 的波阻抗界面。电磁波在经过波阻抗界面时产生反 射,在地面接收并研究不同波阻抗界面反射的电磁 波,可以得到电阻率随深度变化的信息。结合地质资



图 4 地球物理探测点分布图

Fig. 4 Distribution of the geophysical prospecting points

料可对地层的岩性、物性进行研究。该方法所用仪器 尚不能给出准确的参数及数值,主要根据探测频谱曲 线变化进行经验性的解释。由于探测深度大,经济简 便,在云南运用较多。根据云南断陷盆地区较丰富的 探测解释经验,大地电磁频谱探测曲线上的相对低阻 段,往往对应着岩溶裂隙含水层。

本次大地电磁频谱探测曲线显示,低阻段埋深在 1 200 m 左右。根据在昆明地区探测热储层的经验, 比拟电阻率曲线特征判断,对应的层位应为灯影组、 渔户村组岩溶裂隙含水层(图5)。其中6号点推测



图 5 6 号测点大地电磁频谱探测曲线

Fig. 5 Earth electromagnetic frequency spectrum curve of No. 6 prospecting point

的热储层埋深及厚度与地质分析认识较为接近,故选择6号点作为钻孔位置,坐标 E:102°52′35″、N:24° 50′25″,高程2004 m。

3.2 钻探试验成果

通过钻探,钻孔自上而下揭露地层连续(图 6)。 但断裂发育,岩石破碎,岩层倾角变化大,尤其是灯影 组钻进速度变化很大,钻孔护壁困难,分析认为断裂 发育,地层陡倾,视厚度大。终孔抽水试验,静止水位 埋深 152.5 m,采用电潜泵抽水,动水位测量困难,最 终测得降深 27.7 m,涌水量 1 230 m³/d,计算得渗透

深度	地层		层底深	分层厚			
/m	名称	代号	度/m	度/m	地层	柱状	岩性描述
	第四系	Q_4	24.0	24.0	££	E	标红色粘土含灰岩碎石,
100-	上司段	C ₁ d ^s	217. 0	193. 0		HHH	粘土硬型可塑状。 浅灰色、灰色灰岩夹肉 红色泥质灰岩。
200-	万寿山组	$C_1 d^w$	235.0	18.0			,
300- 400-	宰格组	D ₃ zg	480. 0	245.0			浅灰色、灰黄色、深灰 色白云岩,灰质白云 岩。
500-							大舟 波士舟有三山
600-	龙王庙组	$\in_1 l$	640. 0	160. 0			灰色、深灰色日云石, 夹深灰色、黑灰色页 岩。
700-	沧浪铺组	$\in_1 c^2$	707. 0	67.0			深灰色、黑灰色泥岩、 、页岩、砂岩。
800-		$\in {}_1c^1$	780. 0	73.0	· · · ·		灰色、深灰色砂岩、页
900-	筇竹寺组	^{€1q²}	883. 0	103.0			运。 顶部为黑灰色页岩,之
		$\in_1 q^1$	995. 0	112.0			下为徕灰巴贝岩、 泥岩 夹粉砂岩。
1000-	渔户村组	$\in_1 y$	1080. 0	85.0			深灰色贝岩、泥岩夹粉 砂岩,945~975m段以黑
1 100 -						ΗH	灰色页岩、泥岩为主。 深灰浅灰色白云岩夹
1 200 -						Si Si	页岩,995~1020m段以 深灰色、黑灰色页岩为
1 300 -					31 Si Si Si	Si Si Si	主。
1 400 -							灰白色、浅灰色白云岩, 上部含硅质白云岩含黄
1 500 -	灯影组	Z ₂ dn	1857. 0	777.0			铁树。
1600-							
1700-							
1800-							
1900-	陡山陀组	Z ₂ d	2001. 6	144.6			浅灰深灰色白云岩夹 砂岩、页岩,砂岩中含
2 000							云母。

图 6 万溪冲地热钻孔地层柱状图

Fig. 6 Stratigraphic column of the geothermal borehole in Wanxichong valley

系数 1.89 m/d,孔口稳定水温 55 ℃。水化学类型为 HCO₃ • SO₄—Mg • Ca • Na 型,矿化度 207.13 mg/L。 钻探结果与地质分析和物探推测结果基本吻合,证明 前期热储成因分析和孔位论证是合理可靠的,钻探试 验取得了预期的成果。

4 地热田边界外延

通过钻探试验验证了对区域层状热储成因及形 成规律的认识,在此基础上,结合昆明盆地东南部的 地热地质条件,根据热储结构的相似性^[12],推断扩展 昆明地热田东南部边界。

昆明盆地东南部,主要出露古生界地层,轴向近 南北的晋城向斜核部出露中生界红层,根据区测资 料,从古近系到震旦系层序连续完整。在大部分古生 界地层分布区,灯影组、渔户村组埋深大于1000~ 3000 m,具备形成热储层的埋藏条件,钻井深度也不 超过目前经济技术水平允许的深度。但在晋城向斜 核部的中生界地层分布区,实测剖面中生界地层厚度 2792 m,总体为泥质碎屑岩隔水层,下伏接着是峨眉 山玄武岩组(P₂₉)弱透水层(云南省地质局第一水文 地质大队,1982)。故晋城向斜除了在北部仰起端外, 核部中生界地层完整,储热层埋深过大。且由于巨厚 的隔水层封闭,热储层溶蚀裂隙不发育,可能形成有 热无水的状态。

昆明地热田边界向盆地南部扩展部分,东边滇池 流域分水岭以西灯影组、渔户村组呈片状出露地表, 保温盖层不连续,至今无钻孔打出温度满足开发利用 条件的地热水。西边上蒜断裂西盘为上升盘,灯影 组、渔户村组出露地表,缺失了地热增温和保温条件, 欠缺层状热储形成的基本要素;东盘地表出露上古生 界至中生界地层,具有层状热储形成条件。南边晋城 向斜核部上古生界及峨眉山玄武岩组厚度巨大,灯影 组、渔户村组热储层埋深过大,地热田只应扩展至北 部仰起端,仅推测至热储层埋深小于3000 m的部 分。因此,昆明地热田向盆地南部扩展部分的边界, 东接近滇池流域分水岭及近北东向近于顺层的断裂, 西为上蒜断裂,南近于晋城向斜核部(图7)。地热田 向南东扩大面积为306.45 km²。



图 7 昆明地热田外延边界图



5 远景地热资源潜力计算

远景地热资源潜力计算按照《地热资源地质勘查 规范》(GB/T 11615-2010)进行,热储层厚度根据地 热块段内成井资料确定为 647 m;热储层温度利用二 氧化硅地热温标公式计算得出为 90.46 ℃;热储层弹 性释水系数采用昆明地热田资料为 4.616 8×10⁻⁴; 基准温度 53 ℃;热储层孔隙度取 3.5%;推测热储层 顶板埋藏深度 1 282 m;地热水水位埋深 132 m;密 度、比热比拟区域统计数据取值。

依照《地下水资源勘察规范》(SL454-2010)储存量计算要求,计算新增地热水储存量(容积储存量+弹性储存量)。

容积储存量计算公式:

$$Q_s = F \cdot h \cdot \Phi$$
 (1)
式中:Q_s一地热水容积储存量(m³);
F-热储层分布面积(m²);
h-热储层平均厚度(m);
 Φ -热储层岩石的孔隙度(%)。
弹性储存量计算公式:
 $Q_{\#} = S \cdot F(Z - H)$ (2)
式中:Q_#一地热水弹性储存量(m³);
F-热储层分布面积(m²);
Z-热储层顶板埋藏深度(m);
H-地热水水位埋藏深度(m);

S-热储层弹性释水系数,无量纲。

通过公式(1)(2)计算得到新增地热水容积储存 量、弹性储存量。储存量=容积储存量+弹性储存量 =新增地热水储存量=7.17×10⁹ m³。

根据《地热资源评价方法》(DZ40-85)热储法计 算新增地热资源量。

热储方法计算公式:

 $Q_R = C \cdot A \cdot h(tc - tj)$ (3)

式中: Q_R 一热资源量(J);

tc—热储温度(℃);

tj—基准温度(℃);

C一热储岩石和水的平均热容量 $[J/(m^3 \cdot K)]$ 。

 $C = Pc \cdot Cc(1 - \Phi) + Pw \cdot Cw\Phi$ (4)

式中:Pc、Pw分别为热储岩石和水的密度(kg/m³);

Cc、Cw 分别为热储岩石和水的比热[J/(kg•

K)];Φ为热储岩石的孔隙度(%)。

计算得出:C=2 546 464.05 J/(m³ • K)

热资源量 $Q_R = 4.09 \times 10^{10} \text{GJ}$

尚需说明,昆明地热田存在深远程的地热水径流, 这是可循环利用的动储量,但由于研究程度不够,目前 尚未进行过确切的计算和评价。因此,本文所计算的 水、热静储量对于地热田资源潜力的评价是不完全的。

6 结 论

(1)扬子区从地质结构上看,就是一个主要以新

元古界至下古生界地层中的碳酸盐岩为热储层,上下 存在隔水、弱导热地层的层状热储。其中的不整合 面、断裂构造是地热水深远程径流通道。

(2)在扬子区,碳酸盐岩地层埋深足够大,按地温 梯度推算碳酸盐岩热储层温度达到 45 ℃以上的地 段,均具有钻凿可利用的地热水井的地热地质条件, 尤其是在断陷盆地中。

(3)根据钻探成果,昆明地热田东南边界可由呈 贡吴家营附近向南推进至晋城镇南边,外延 20 余 km,扩大面积 306.45 km²。由此预测,随着城市的 发展,昆明地热田外围探采井的增多、深度增大,热田 规模还会进一步扩展,并可望勘探和开采更深层的元 古界碳酸盐岩岩溶裂隙热储层。

参考文献

- [1] 范承均,熊家镛,王义昭.云南区域地质志[M].北京:地质出版 社,1990.
- [2] 潘桂堂,肖庆辉,陆松年,等.中国大地构造单元划分[J].中国地 质,2009,36(1):1-16.
- [3] 任美锷,刘振中,王飞燕,等. 岩溶学概论[M]. 北京:商务印书 馆,1983.
- [4] 王宇,李燕,谭继中,等. 断陷盆地岩溶水赋存规律[M]. 昆明:云 南科技出版社,2003.
- [5] 张远志,张定辉,刘世荣,等.云南省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [6] 彭淑惠,李芹,周翠琼,等.云南省昆明市呈贡新区地热资源调查 评价报告[R].昆明:云南省地质环境监测院,2013.
- [7] 王宇.西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J].中国岩溶,2002,21(2):114-119.
- [8] 胡毅力,温一波,段继平,等. 滇池盆地东缘白邑一横冲断裂南段的浅层地震勘探研究[J]. 震灾防御技术,2010,5(4):451-460.
- [9] 荆振杰,杜义,谢富仁.昆明周边地区活动断层滑动与现代构造 应力场[J].地震学报,2008,30(3):230-239.
- [10] 王宇,彭淑惠,王梓溦,等.云南省抗旱井定井论证方法[J].中 国岩溶,2013,32(3):305-312.
- [11] 王宇,谭继中,匡大同,等.云南省昆明市呈贡吴家营水源地供水详查报告[R].昆明:云南省地矿局第一水文地质工程地质 大队,1991.
- [12] 王宇,杨世瑜.香格里拉盆地地热地质特征及勘探前景[J].矿 物岩石地球化学通报,2003,22(3):265-269.

The genesis and extension of Kunming geothermal field

WANG Yu¹, KANG Xiao-bo², ZHANG Hua², WANG Yan³

(1. Yunnan Bureau of Geological Survey, Kunming 650051, Yunnan, China;
2. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming 650216, Yunnan, China;
3. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China)

Abstract A combined exploration & production well was drilled successfully in Wanxichong valley, in the periphery of Kunming geothermal field. The depth of the well is 2 001.6 m, the water temperature at the well head is 55 °C, and the pumping rate of the well is 1 230 m³/d. Through the drilling study, the following formation rules of the sedimentary geothermal reservoir in Yunnan province can be summarized. Firstly, for areas where the depth of the carbonate rock strata is large enough, and areas where the temperature of the thermal water is estimated to be higher than 45 °C according to geothermal gradient in the carbonate rock, these areas can be target areas for constructing geothermal wells, especially in faulted karst basins. Secondly, the distribution of carbonate rock strata in Upper Sinian Series Dengying Formation and Lower Cambrian Series Yuhucun Formation is very stable and the unconformable surfaces, faults and fracture structures in these carbonate rock strata form the major channels of the deep confined thermal water, resulting in the development of deep buried karst in the carbonate rock strata. Therefore, these carbonate rock strata have been common thermal water aquifers. Based on the above-mentioned rules and the geological and hydrogeological investigation, it is advised that the southeastern boundary of Kunming geothermal field can be extended from Wujiaying Village of Chenggong County to the southern side of Jincheng Town for around 20 km. **Key words** geothermal, borehole, stratum, geological structure, deep and long distance runoff

(编辑 吴华英)