

兰西地区地热成藏模式及资源量预测

汪 佳¹施尚明²刘志舟³朱焕来²

(1. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712; 2. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318; 3. 大庆钻探工程公司, 黑龙江 大庆 163416)

摘要: 松辽盆地地热资源丰富, 分析松辽盆地兰西地区地热地质条件、热源及导热构造特征、热储和储层物性分布特征, 构建该区地热成藏模式; 建立资源量计算模型, 计算地地质资源量、地热水资源量和可开采资源量, 并折算为标准煤当量进行对比; 结合邻井测井、开发资料, 计算单井井口温度和产能。研究表明: 研究区泉头组三、四段为良好的地热水储层, 地地质资源量为 5.49×10^{18} J, 地热水资源量为 64.7×10^8 m³, 可采地热水资源量为 0.174×10^{18} J; 邻井单井地热水产能为 265.1~421.8 m³/d, 井口温度为 38.9~43.8℃, 综合分析具有较好的地热开发潜力。研究结果对兰西地区及松辽盆地类似地区地热资源勘探开发提供有利指导。

关键词: 兰西 地热 成藏模式 资源量 泉头组 松辽盆地

中图分类号: P314; TE02

The reservoir formation model and resources prediction in LanXi region

WANG Jia¹; SHI Shangming²; LIU Zhizhou³; ZHU Huanlai²

(1. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd,

Daqing 163712, China 2. College of Geosciences of Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

3. Daqing Drilling Engineering Company, Daqing 163416, China)

Abstract: Songliao Basin is rich in geothermal resources, geothermal field analysis of geological conditions, heat and thermal conductivity of tectonic features Lanxi Songliao Basin region, distribution of geothermal reservoir characteristics, research in the area of geothermal reservoir model; establish a resource calculation model to calculate the geothermal resources and geology exploitation of resources and contrast; combine adjacent well logging, exploratory development, forecasts of geothermal resources in the study area. Lanxi and similar studies on geothermal exploration and development to provide strong guidance.

Key words: Lanxi geothermal reservoir formation model resources Quantou formation Songliao Basin

0 前言

地热资源作为一种天然能源, 来源于地下岩浆熔融和放射性物质的衰变, 由地下水经深部循环将热量带至地表层, 具有热能蕴藏量大、可再生和清洁等优点, 是开发前景很好的新的和可再生的能源^[1]。

国外对地热资源利用较早, 20 世纪初意大利利用地热能发电, 冰岛首先将地热水用于室内取暖, 新西兰、日本、美国和其他国家先后建立地热发电站, 对地热资源勘探技术和方法发展处于领先地位^[2-4]。我国地热资源较为丰富, 但研究深入程度不足。地质勘探部门汇总我国温泉调查结果, 于 60 年代中期编制全国温泉分布略图, 建立地热实验室, 获得部分地点的地温梯度资料。从 70 年代初期, 我国学者开始系统研究地热资源; 至 80 年代初, 出版了相当数量的地热研究著作。目前我国研究人员对地热的研究进一步深入到开发利用阶段, 对我国地热资源的地质背景、分布规律及成因进行了深入研究, 并将研究成果用于指导地热资源的开发利用^[5]。地热资源评价方法、热史波动模型、地热成藏模型, 以及地热能利用与环境效应和持续发展的关系等, 研究领域不断深入。

兰西县隶属于黑龙江省绥化市, 是绥化市的下辖县。位于松嫩平原东南部, 南距省城哈尔滨市 67 公里, 北邻青冈县, 东连绥化市, 南接呼兰县, 西界肇东市。兰西地区地热资源丰富。随着地热资源作为绿色能源别广泛利用, 日益受到重视^[6-7]。但该地区地热勘探开发较晚、资料较少、地质条件认识不足、资源量不清, 尚无开发地热井, 本文利用区域勘探开发资料, 以及邻井资料, 分析该地区地热开发潜力, 指导同类地区地热资源的开发利用。

基金项目: 国家自然科学基金(41302210)

作者简介: 汪佳(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事油藏精细描述和储量评价等方面的研究。

E-mail: wangjiawinner@163.com

1 地质概况

兰西县位于北纬 46°2′~46°38′，东经 125°42′~126°38′，在构造上位于松辽盆地的东北隆起带内，其中的二级构造可划分为绥化凹陷和呼兰隆起带。研究区的大部分地区位于绥化凹陷中，东南部有一小块地区位于呼兰隆起带上，本次研究的重点区位于绥化凹陷内（见图 1）。

松辽盆地的基底是古生代变质岩系和火山岩，是中—新生代含油气盆地；盆地的沉积盖层主要有第四系、第三系、白垩系和侏罗系。据钻井资料揭示，研究区主要地层从下向上依次发育上侏罗系的火石岭组，白垩系的沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组，第三系的大安组、泰康组，以及第四系^[5]。其中泉头组三、四段热源、热储条件较好，为本文重点研究的目的层。

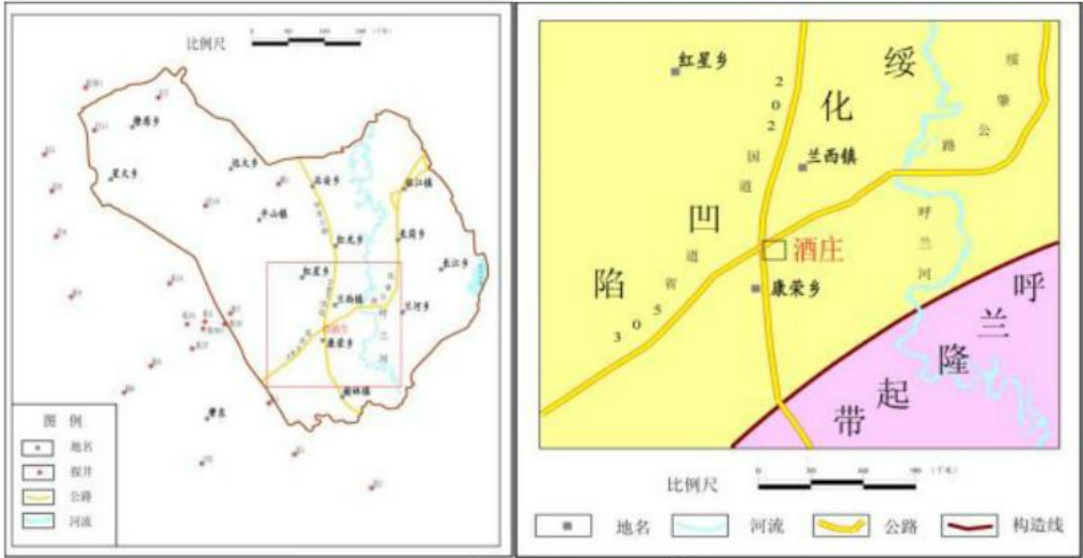


图 1 兰西地区地理位置和区域构造图
Fig.1 Location map and tectonic map of Lanxi

2 地热成藏模式

2.1 热源及导热构造

地球的内能是地热资源的主要热能来源，地下热源包括地幔供热、岩浆体供热、放射性元素衰变生热、粘土矿物脱水生热以及断层两盘相对位移摩擦生热等形式，其中对地热资源形成起重要影响的热源是地幔供热、放射性元素衰变生热、岩浆体供热。

地温梯度反映地热增温带中温度随深度的变化规律，以每 100 m 的变化值为标准，表示为

$$R = (T - T_0) / (H - H_0) \times 100, \tag{1}$$

式中：R—地温梯度，℃/100 m；T—实测温度，℃；T₀—恒温带温度，℃；H—测温点深度，m；H₀—恒温带深度，m。

研究区恒温带深度为 20 m，恒温带温度为 4.5℃。根据大量实测数据和恒温带温度、深度及年平均温度资料^[8]，确定研究区的地温梯度分布范围为 4.0~4.5℃/100 m，高于松辽盆地地温梯度平均值 3.8℃/100 m，在松辽盆地内属于地温梯度较高地区。研究区地温梯度高值区位于东南部，为 4.5℃/100 m 左右；低值区位于研究区的北部，为 4.0℃/100m。地温梯度由南向北逐渐变小；重点区地温梯度约为 4.15℃/100 m。研究区地温梯度、大地热流值和莫霍面深度等地热资源评价参数，与我国东北其他地区平均值对比见表 1。

表 1 研究区与其他地区热源参数对比结果

Table 1 The results of heat source parameter Compared with other areas			
地区	地温梯度/℃/100 m	大地热流值/(mW·m ⁻²)	莫霍面深度/km
研究区	4.3	60	31.75
我国东部平均	3.8	52	48.25

研究区具有地温梯度及大地热流高的地温场特点，莫霍面埋藏浅，且花岗岩分布广泛，使盆地内具有丰富的深部热源，为各热储层提供了统一的热源，局部构造与岩性因素所导致的聚热作用对现今地温场也有一定影响，盆地内发育的断裂带可作为深部热源与上部热储之间良好的通道。

由研究区地震解释剖面图上可见：该区深部断裂发育，为联系深部热源与上部热储的良好通道（见图 2）。

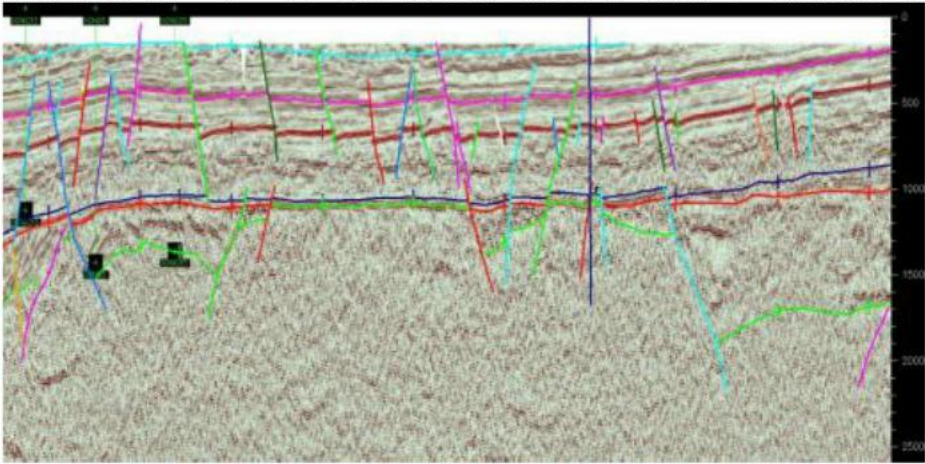


图 2 研究区 T2—T3 反射层剖面断裂分布图
Fig.2 Section fracture in T2-T3 distribution map

2.2 热储及隔水层

热储是地热资源潜力研究的核心，沉积盆地地下地热资源是通过热储中的流体为载体来进行地热资源的开发利用。研究区包括 4 套热储组合：（1）深部热储组合，由侏罗系和登娄库组地层组成，泉一、二段泥岩为深部热储组合良好的区域性隔水层；（2）扶余—杨大城子热储组合由泉三、四段地层组成，以泉一、二段和青一段两套地层为区域性隔水层；（3）高台子热储组合由青二、三段地层组成，以青一段泥岩和青二、三段顶部泥岩为隔水层，同其上部的嫩一、二段地层为良好的区域性盖层；（4）萨尔图—葡萄花热储组合由姚家组地层组成，青二、三段顶部泥岩为其与下部高台子热储组合的隔水层，同时上部的嫩一、二段地层为良好的区域性盖层（见图 3）。

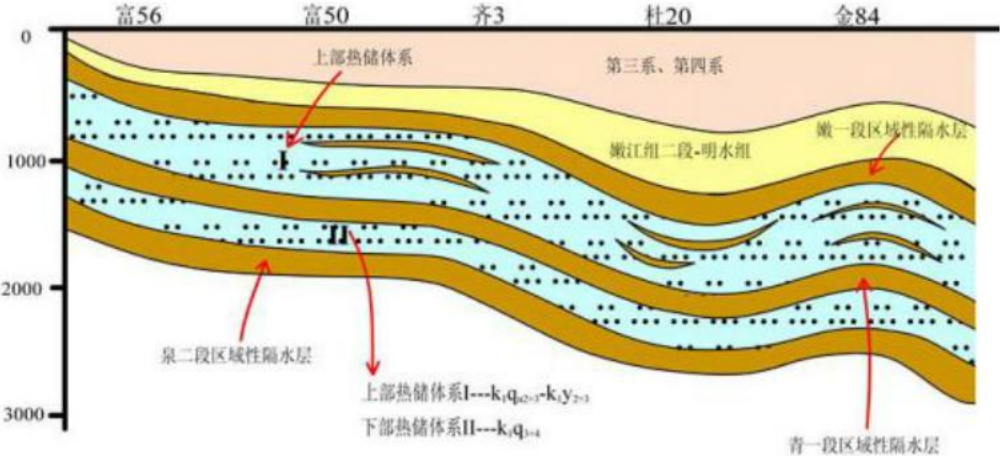


图 3 松辽盆地北部热储系统示意图
Fig.3 Thermal energy storage system in northern Songliao Basin

根据研究区地层发育情况，结合地层温度特征，我们发现本区姚家组和青山口组的地层埋深很浅，约为 300~610 m，地层温度过低，不作为热储层进行研究；研究区泉头组三段孔隙度分布范围为 18%~3.5%，高值区位于西北部；渗透率分布范围为 $(75\sim300) \times 10^{-3} \mu m^2$ ，高值区位于研究区的西北部。本次研究的重点区泉头组三段孔隙度约为 20.75%，渗透率约为 $145 \times 10^{-3} \mu m^2$ ；研究区泉头组四段孔隙度分布范围为 19.5%~25%，高值区位于西北部；渗透率分布范围为 $(100\sim350) \times 10^{-3} \mu m^2$ ，高值区位于研究区的西南部^[9]。本研究的重点区泉头组四段孔隙度约为 22%，渗透率约为 $300 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。

3 地热资源量计算

研究区地热资源量计算依据国家标准 GB/T 11615-2010《地热资源地质勘查规范》中规定进行。

3.1 计算公式

（1）地热资源量

地热资源量也叫地热储量，是指在当前经济技术可行的勘查深度内，经过勘查工作，一定程度上查明储存于热储岩石及其孔隙中的地热流体所赋存的地热资源量^[10]。计算公式：

$$Q_R = C \cdot A \cdot H \cdot (T - T_0), \quad (2)$$

式中: Q_R —地热资源量, J; C —热储层中岩石与水的平均比热容, $J/m^3 \cdot ^\circ C$;

$C = C_{\text{岩石}} \cdot \rho_{\text{岩石}} \cdot (1 - \phi) + C_{\text{水}} \cdot \rho_{\text{水}} \cdot \phi$ 。 $\rho_{\text{水}}$ 、 $\rho_{\text{岩石}}$ —水和岩石的密度, kg/m^3 ; $C_{\text{岩石}}$ 、 $C_{\text{水}}$ 分别为岩和水的比热, $J/kg \cdot ^\circ C$; ϕ —岩石的孔隙度, %; A —热储面积, m^2 ; H —热储厚度, m; T —热储层温度, $^\circ C$; T_0 —恒温层温度, $^\circ C$ 。

(2) 地热水资源量

地热水资源量计算公式为:

$$Q_w = C_{\text{水}} \cdot \rho_{\text{水}} \cdot A \cdot H \cdot \phi \cdot (T - T_0) \quad (3)$$

式中: Q_w 为热储层中的地热水中所含的热量; A 为热储面积; H 为热储厚度; T_0 为基准面温度。

(3) 地热水可采资源量

地热水可采资源量计算公式为:

$$Q_{rw} = C_{\text{水}} \cdot \rho_{\text{水}} \cdot A \cdot H \cdot \phi \cdot (T - T_q) \cdot R_e \quad (4)$$

式中: R_e 为可采程度, 无量纲, 本文设定值为 0.25。

(4) 单井地热水产能和温度

地热水单井自然产能是各热水层在地层压力作用下产能的总和, 即:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i, \quad (5)$$

式中: Q 为单井日产热量 m^3/d ; q_i 为单层热水产能 m^3/d ; n 为热水层数。

计算单层热水产能采用裘皮公式:

$$q = \frac{542.871 \cdot K \cdot h \cdot (p_i - p_{wf})}{B \cdot \mu \left(\ln \frac{r_i}{r_w} + S \right)}, \quad (6)$$

式中: q 为热水层日产水量 m^3/d ; K 为渗透率 μm^2 ; h 为热水层厚度 m; p_i 为原始地层压力 MPa; p_{wf} 为井底流动压力 MPa; B 为体积系数 m^3/m^3 ; μ 为地下热水粘度 mPa·S; r_i 为影响半径 m; r_w 为井筒半径 m; S 为表皮系数。

计算地热水单井井口温度, 其实质问题是将地下目的层位的地下温度, 减去热水开采过程中在井筒中的热损失。因此, 计算的重点即为井筒的热损失。

根据热动态平衡原理, 流体的热损失等于向水泥环传递的热量:

$$dq = -W \cdot C dT_1, \quad (7)$$

式中: $dq = 2\pi r_3 U (T_1 - T_2)(-dz)$ 。

从水泥环向地层传导的热量可表示为:

$$dq = 2\pi k \cdot \frac{T_2 - T_e}{f(t)} (-dz), \quad (8)$$

式中: T_e 为未受干扰的地温场温度, $T_e = a \cdot (z - z^*) + b$ 。

可建立如下方程:

$$\frac{dT}{dz} + \frac{T}{A} - \frac{a \cdot (z - z^*) + b}{A} = 0, \quad (9)$$

$$A = \frac{W \cdot C \cdot (\lambda + r_3 U f(t))}{2\pi r_3 U \lambda}$$

式中:

对式 9 积分可得:

$$T(z,t) = e^{-\frac{z-z_0}{A}} \times [T_0 - a(z_0 - z^*) - b - aA] + a(z - z^*) + b + aA, \quad (10)$$

式中： T_0 为在深度 z_0 处水的温度，℃； T 为计算出来的在深度 Z 处的水的温度，℃； a 为地温梯度，m/℃； b 为常温层温度，℃； z^* 为常温层深度，m； W 为水的产量，kg/s； z 为深度，m； k 为岩层热导率，W/(m×℃)； C 为水的热容，J/(℃)； r 为半径，m； u 为总传热系数，W/(m²·℃)； $f(t)$ 为时间函数。

3.2 计算结果

研究区地热地质资源量、可采资源量和地热水资源量计算结果见表 2。由表 2 可知：研究区地热地质资源量总量为 5.49×10^{18} J，折合标准煤约 1.9 亿 t。其中泉四段平均砂体厚度 20.8 m，平均孔隙度 20.5%，地热水资源量为 1.73×10^{18} J，折合标准煤 0.6 亿 t，泉三段平均砂体厚度 33.6 m，平均孔隙度 19.4%，地热资源储量为 3.76×10^{18} J，折合标准煤 1.9 亿 t。

研究区地热水资源量总量为 64.7×10^8 m³；可采地热能资源量为 0.174×10^{18} J，折合标准煤 601.8 万 t。其中泉头组四段地热水资源量为 25.6×10^8 m³，可采地热能资源量为 0.054×10^{18} J，折合标准煤 182.7 万 t；泉三段地热水资源量为 39.1×10^8 m³，可采地热能资源量为 0.12×10^{18} J，折合标准煤 419.1 万 t。

表 2 研究区地热资源计算结果

Table 2 The results of geothermal resources

地层	面积/km ²	平均砂体厚度/m	平均孔隙度/%	地质		可采		地热水资源量/ 10^8 m ³
				资源量/ 10^{18} J	折合标准煤/ 10^8 t	资源量/ 10^{18} J	折合标准煤/ 10^8 t	
泉四段	600	20.8	20.5	1.73	0.6	0.054	182.7	25.6
泉三段	600	33.6	19.4	3.76	1.3	0.12	419.1	39.1
合计				5.49	1.9	0.174	601.8	64.7

4 实例预测

从东 5、东 7、东 33、东 35 水层测井解释数据资料（见表 3）可见，研究水层发育，泉头组水层厚度大于 100 m；上部泉头组三段、四段地层的有效孔隙度比较大，随着埋深的增加，下部泉头组二段、一段地层的有效孔隙度逐渐减小。

表 3 邻井泉头组含水层测井解释结果

Table 3 The interpretation results in Quantou Aquifer of adjoining wells

井名	深度/m			孔隙度/%		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均
东 5	740	1491.8	1115.9	6	35	21.85
东 7	781	1297.2	1039.1	16	32	24.71
东 33	844.8	1419	1131.9	12	32	21.32
东 35	740	1491.8	1115.9	6	35	24.39

利用单井产能及井口温度预测模型，结合邻近油田探井东 7、东 35 等井的资料，对东 7、东 35 等井产能进行预测，结果见表 4：

表 4 邻近探井产能及井口温度预测表

Table 4 Production capacity and Wellhead's temperature of adjoining wells table

井号	顶深/m	底深/m	层位	地温梯度/(0.01℃·m ⁻¹)	水层厚度/m	产能/(m ³ ·d ⁻¹)	井口温度/℃
东 5	740.0	1491.8	K1q4-K1q1	4.15	123.8	580.2	42.0
东 7	781.0	1297.2	K1q4-K1q2	4.10	63.8	414.1	42.7
东 33	844.8	1419.0	K1q4-K1q2	4.08	86.0	421.8	43.8
东 35	762.8	1436.6	K1q4-K1q1	4.30	112.6	265.1	38.9

由表 4 可知：东 5、东 7、东 33 井产能均大于 400 m³/d，井口温度均大于 40℃；东 35 井产能较低为 265.1 m³/d，井口温度略低，为 38.9℃。

5 结论

(1) 松辽盆地兰西地区地温梯度较高，为 4.3℃/100m，大地热流值为 60 mW/m²，莫霍面深度较浅，小于 31.75 km，地震资料显示基底断裂发育，断距较大，为地热资源勘探的有利条件，蕴藏丰富的中低温地热资源。

(2) 扶余—杨大城子组热储组合由泉三、四段地层组成，埋藏较深、地层温度较高、热储较发育，以

泉一、二段和青一段两套地层为区域性隔水层,是研究区有利热储组合。

(3) 计算研究区泉三、四段地热地质资源量平均为 5.49×10^{18} J, 地热水资源量为 64.7×10^8 m³, 可采地热水资源量为 0.174×10^{18} J, 表明该地区地热资源储量较大, 但可采量相对小, 需要合理规划, 有序发展、综合利用、控制地热开采量, 提高地热资源的利用率。以获得更好的经济效益和社会效益。

(4) 利用临近油田探井测井、开发动态资料计算单井地热水产能及井口温度, 结果表明: 邻近地区井地热水产能约为 265.1~580.2 m³/d, 井口温度约为 38.9~43.8℃, 具有较好的地热开发潜力。

参考文献:

- [1]. 王先彬. 研究与寻找新的油气资源、开拓勘探新领域[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21 (1): 22-25.
- [2]. Lund J W. Direct utilization of geothermal energy[J]. Energies, 2010, 3 (8): 1443-1471.
- [3]. Birch F, Roy R F, Decker E R. Heat flow and thermal history in New England and New York[J]. Studies of Appalachian geology: northern and maritime, 1968: 437-451.
- [4]. Tissot B P, Pelet R, Ungerer P H. Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation[J]. AAPG bulletin, 1987, 71 (12): 1445-1466.
- [5]. 邱楠生. 中国大陆地区沉积盆地热状况剖面[J]. 地球科学进展, 1998, 13 (5): 447-451.
- [6]. 朱焕来. 松辽盆地北部沉积盆地型地热资源研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [7]. 刘妍. 对林甸地区地热资源的初步认识[J]. 油气井测试, 2003, (5): 69-70.
- [8]. 蔡青, 薛福利. 大庆地区地热田成藏要素及成藏机制研究[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37 (2): 120-121.
- [9]. 王宝林. 大庆油田萨南二, 三区高台子油层砂体成因及储层物性参数研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2005.
- [10]. 王旭. 大庆市肇州地热田热储特征与中低温热水资源评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.

创新点: 结合邻井测井、开发资料, 计算出单井井口温度和产能。

评价区域地热资源资源, 折算资源潜力。