

南北地震带硅热流值及其分数维特征

王 非

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文应用 80 年代 C. A. Swanberg 和 P. Morgan 提出的经验公式 $Q_{\text{SiO}_2} = (T_{\text{SiO}_2} - b)/m$ 和根据石英地温计测得的地下水温度研究了南北地震带硅热流值及其分数维特征, 进行了趋势分析。同时结合地质背景, 探讨了南北地震带硅热流值与构造活动的关系, 给出了大地热流值的轮廓并讨论了硅热流法的应用前景。

主题词: 分数维 南北构造带 活断层 地热流 硅热流值

1 原理及计算方法

1.1 原理

石英地温计对于地下温度大约在 150℃ 以上的井孔水具有最佳的适用性, 它对某些热泉水的适用性也不错。硅地温计是以石英在水中的溶解度对温度的依赖关系为基础的, 通常用于热水以估算地热系统中热储的基础温度。按照 Truesdell(1976) 的冷却传导方程可定量地描述为:

$$T_{\text{SiO}_2} = \frac{1315}{5.205 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15 \quad (1)$$

式中 T_{SiO_2} 为硅地温摄氏度数, 溶解硅 SiO_2 以 mg/l 表示。

这种地温计在应用时应考虑下列因素: a. 方程(1)所适用的温度区间一般为 0—250℃, 如果超过了 250℃, 那么该方程便急剧偏离实验曲线(图 1 中的曲线 A), 因而不再适用于这一温标; b. 蒸汽分离的影响。随着水的沸腾化, 残余液体中的二氧化硅浓度与分离走的蒸汽量成比例地增加, 因此在这种情况下必需对上述公式进行校正(校正办法参考《地热系统》一书); c. 采样前后二氧化硅可能聚合或沉淀, 这样求出的二氧化硅浓度偏低, 导致二氧化硅温标温度的严重偏低; d. pH 值的影响。pH 值能够影响石英在水中的溶解度, 导致计算结果的偏差。

在过去的工作中, 公式(1)曾大量应用于世界范围内的硅地温计算, C. A. Swanberg 和 P. Morgan(1980) 依据美国的计算结果和 5 个主要热流区的平均值, 推导出下面的回归方程:

$$T_{\text{SiO}_2} = mq + b \quad (2)$$

其中 m 和 b 为回归系数, 其物理意义为: m 表示与地下水最小循环深度相关的数, b 为当地年平均气温。这样作出的 T_{SiO_2} 等值线图可表示出低温热流区、正常热流区、中等热流区 and 高热流区。

1.2 证明

下面我们来验证公式(2)可以用于预测区域热流值。大地热流值 q 的定义方程可写成:

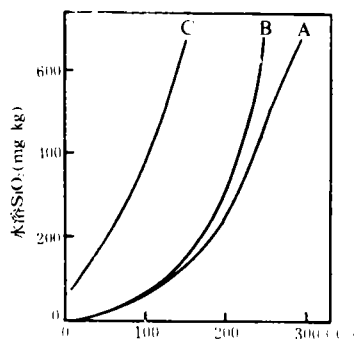


图1 在溶液的蒸汽压力下作为温度函数的石英(A)和无定形二氧化硅(C)的溶解度。曲线B表示一种初始石英饱和溶液经绝热冷却到100℃而二氧化硅又没有发生任何沉淀的情况下溶液中可能的SiO₂量。

Fig. 1 The solubility of quartz (A) and SiO₂(C) without definite forms. Curve B is quantity of SiO₂ in saturated solution.

二氧化硅浓度达到饱和程度的硅质矿物(这种假设是合理的),这样,来自不同构造、地理和地质条件下的地下水就都可利用了。按照公式(1)可以得出某一深度的温度。利用一个区域平均岩石热导率可以用公式(5)算得深度Z,然后,根据温度深度数据与年平均地表气温结合算出地热梯度。最后根据公式(2)用硅地温计直接算出区域热流值。

1.3 精度

此方法的精度^[1-2]可达 $7.5 \pm 0.0678 \text{ qmWm}^{-2}$ 。但这要求在每个 $1' \times 1'$ 经纬网格内要有若干个可以提供二氧化硅温标温度极限值的地下水样,并且它们的标准偏差不大于25℃。回归结果表明,m取值范围为 $680 \pm 67 \text{ Cm}^2\text{W}^{-1}$,b值可随当地年平均气温的变化而变化(图2)。

2 南北地震带硅热流值

应用上述方法,作者通过几年的工作,研究了南北地震带北段的硅热流值。所采用的数据分别引自宁夏水文一队、宁夏水文二队、甘肃水文一队、兰州军区84994部队、兰州水文总站、兰州铁路局及四川水文队^[3]等单位,共计5,500多个数据,整理后实用3,448个。经整理后,这些数据覆盖面积大且分布均匀,数值分布也较合理(图3)。为了减少年平均气温的地区性差异,b值在本例中取 $1' \times 1'$ 经纬网格内各县年平均气温的平均值;m值取 $670 \text{ Cm}^2\text{W}^{-1}$,这是考虑到甘肃、宁夏等地区地下水的的核心循环深度(2.13 km)和研究区内的平均热导率($3.13 \text{ W/m}^0\text{k}$)。

$$q = kdT/dZ \quad (3)$$

式中k为岩石热导率,dT/dZ为地热梯度,将(3)式代入(2)式中并解所得微分方程,得

$$(T_{\text{SiO}_2} - b)Z = mk(T_z - T_0) \quad (4)$$

T₀和T_z分别为地表和地下Z深度处的温度,mkT₀为积分常数。T₀为地表温度,可以将其看作为该处的气温,则T₀=b;T_z为地下Z深度处的温度,可以认为它就是我们需要求得的此处的硅地温度,所以有T_z=T_{SiO₂},则(4)式可以简化为

$$Z = mk \quad (5)$$

Z是最后达到水岩平衡时的深度或是地下热储的深度,既然m和k已确定,则Z也可以确定。因此估算地下水循环深度Z就成为可能。如果考虑到循环着的地下水向总的热流中提供的一个对流分量,或者说如果已经发生了硅沉淀,则这个深度就是一个最小循环深度,更确切地说,是最小平均循环深度。

我们假设岩石静压力是控制有效渗透性的主要因素,几乎全部岩石都含有足以使地下水

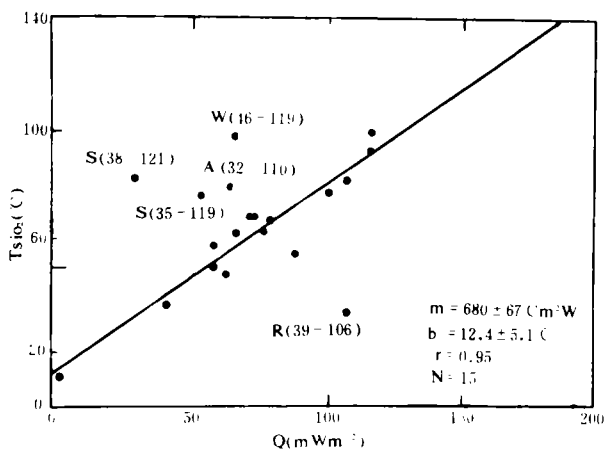


图 2 $1' \times 1'$ 经纬方块内硅地温与热流对应图

Fig. 2 Relation between silica temperature and heat flow in $1' \times 1'$ regions.

2.1 趋势面分析

应用多项式趋势面分析技术对南北地震带(东经 $98^\circ - 108^\circ$, 北纬 $26^\circ - 40^\circ$)二氧化硅热流值进行趋势分析,而后追踪其趋势性变化。设

$$w = \alpha + \beta_1 u + \beta_2 v + \beta_3 u^2 + \beta_4 v^2 + \beta_5 uv + \dots + e \quad (6)$$

是我们将要拟合的趋势面,其中 e 是随机起伏。

以统计量 $a, b_1, b_2, b_3, \dots$ 来估计系数 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$, 用统计量 Se^2 估计方差 δe^2 , 作最小二乘方回归分析,得正规方程组:

$$S \cdot b = P \quad (7)$$

即

$$\begin{bmatrix} \Sigma 1 & \Sigma u & \Sigma v & \Sigma u^2 & \Sigma uv & \Sigma v^2 & \Sigma u^3 & \Sigma u^2 v & \Sigma uv^2 & \Sigma v^3 & \dots \\ \Sigma u & \Sigma uv & \Sigma uv & \Sigma u^3 & \Sigma u^2 v & \Sigma uv^2 & \Sigma u^4 & \Sigma u^3 v & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma uv^3 & \dots \\ \Sigma v & \Sigma uv & \Sigma v^2 & \Sigma u^2 v & \Sigma uv^2 & \Sigma v^3 & \Sigma u^3 v & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma uv^3 & \Sigma v^4 & \dots \\ \Sigma u^2 & \Sigma u^3 & \Sigma u^2 v & \Sigma u^4 & \Sigma u^3 v & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma u^5 & \Sigma u^4 v & \Sigma u^3 v^2 & \Sigma u^2 v^3 & \dots \\ \Sigma uv & \Sigma u^2 v & \Sigma uv^2 & \Sigma u^3 v & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma uv^3 & \Sigma u^4 v & \Sigma u^3 v^2 & \Sigma u^2 v^3 & \Sigma uv^4 & \dots \\ \Sigma v^2 & \Sigma uv^2 & \Sigma v^3 & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma uv^3 & \Sigma v^4 & \Sigma u^3 v^2 & \Sigma u^2 v^3 & \Sigma uv^4 & \Sigma v^5 & \dots \\ \Sigma u^2 & \Sigma u^4 & \Sigma u^3 v & \Sigma v^5 & \Sigma u^4 v & \Sigma u^3 v^2 & \Sigma u^6 & \Sigma u^5 v & \Sigma u^4 v^2 & \Sigma u^3 v^3 & \dots \\ \Sigma u^2 v & \Sigma u^3 v & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma u^4 v & \Sigma u^3 v^2 & \Sigma u^2 v^3 & \Sigma u^5 v & \Sigma u^4 v^2 & \Sigma u^3 v^3 & \Sigma u^2 v^4 & \dots \\ \Sigma uv^2 & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma uv^3 & \Sigma u^3 v^2 & \Sigma u^2 v^3 & \Sigma uv^4 & \Sigma u^4 v^2 & \Sigma u^3 v^3 & \Sigma u^2 v^4 & \Sigma uv^5 & \dots \\ \Sigma v^2 & \Sigma uv^3 & \Sigma v^4 & \Sigma u^2 v^3 & \Sigma uv^4 & \Sigma v^5 & \Sigma u^2 v^2 & \Sigma u^2 v^4 & \Sigma uv^5 & \Sigma v^5 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \\ b_9 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma w \\ \Sigma wu \\ \Sigma wv \\ \Sigma wu^2 \\ \Sigma wuv \\ \Sigma wv^2 \\ \Sigma wu^3 \\ \Sigma wu^2 v \\ \Sigma wuv^2 \\ \Sigma wv^3 \\ \dots \end{bmatrix}$$

解方程组可以求出系数 $a, b_1, b_2, b_3, \dots$, 从而得到趋势面方程:

$$\hat{w}_i = a + b_1 u_i + b_2 v_i + b_3 u_i^2 + b_4 u_i v_i + b_5 v_i^2 + \dots \quad (8)$$

将第 i 个点上的 w_i 值的坐标 (u_i, v_i) 代入趋势面方程即可求出该点的趋势值 $\hat{w}_i$, 把所有点求出后, 可按 $\hat{w}_i$ 值的一定间隔画出趋势等值线, 从而得出某一地质数据的变化趋势。

应用上述方法, 对南北地震带二氧化硅热流值数据进行 5 次趋势面分析, 结果如图 4。

由图 4 可大致看出南北地震带硅热流地温场轮廓, 其变化范围为 $27.1 - 82.3 \text{ mW/m}^2$ 。与该区活动断裂(图 5)对比, 发现其分布吻合很好。川西地区硅热流等值线走向基本呈南北向, 与横断山基本构造格局一致, 可以看到有两个高异常带, 即甘孜—理塘带, 马儿康—康定—九龙带。从图 4 可以看到, 在前两个高异常带地区, 断裂密集, 出露大片花岗岩基岩。断裂密集有利于地下水循环, 会使整个地区热传输能力增强; 花岗岩中放射性同位素含量高, 因

此热流值显示高异常。低值带对应的地区是三叠系沉积地层覆盖区,在构造上为一复向斜,这种地区大地热流值偏低。在南北地震带北段,即甘肃东部和宁夏地区,硅热流值等值线走向基本上呈北西向及北北西向,与这一地区活动断裂走向一致。从整体上看,该地区硅热流值梯度较川西地区小。北段大体上有一个高异常带,即固原一通渭带,其等值线的形态象一背斜,背斜的轴走向和固原—海原地震破裂带走向一致。该地区大致上有两个高值点,固原地区(82.5 mWm^{-2})和天水—秦安地区(67.3 mWm^{-2})。固原地区位于几组北西向和南北向活动断裂的交叉带上,历史上曾发生过海原大地震。1989年以来这一地区地震活动有所增强。天水—秦安地区位于秦岭北缘大断裂活动带上。据张

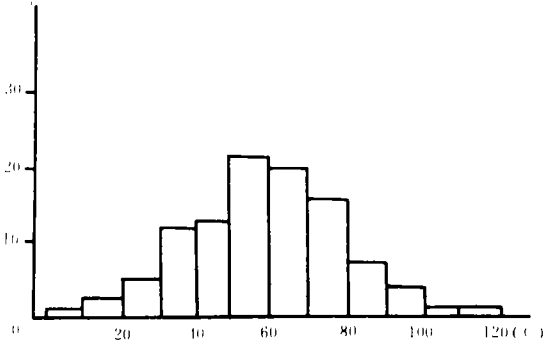


图 3 南北地震带 T_{SiO_2} 分布频率直方图
Fig. 3 Histogram of T_{SiO_2} distribution frequency along the North-South seismic belt.

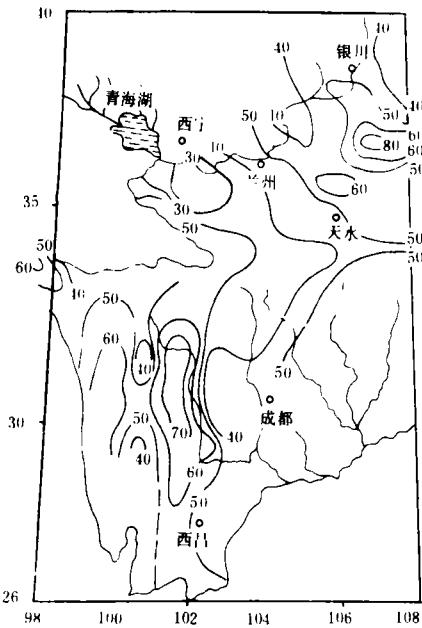


图 4 南北地震带 q_{SiO_2} 5 次趋势面
Fig. 4 Five-times trend of q_{SiO_2} along the North-South seismic belt.

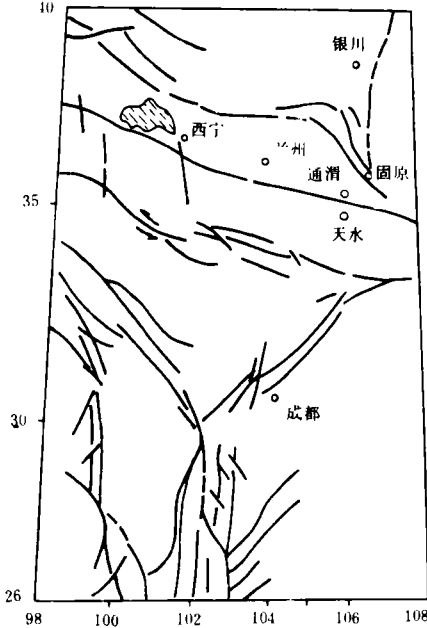


图 5 南北地震带主要活动构造
Fig. 5 Main active tectonics along the North-South seismic belt.

必数等人的研究,天水一带的居里等温面有一 200℃ 的温差,形成一异常带。沉积层厚、构造简单的地区硅热流值较低,如腾格里沙漠及甘肃夏河一带。

上面我们应用趋势面分析了硅热流值的分布趋势,以下分析其空间分布的分数维特征,并研究其分布与地质构造之间的内在联系。

2.2 分数维特征

在整个研究区内,测量所有的硅热流值分布点之间的距离 r ,并分析 r 的分布。如果硅热流值的分布图像是自相似的话,可得出下列关系^[4]:

$$N(R<r)\propto r^D$$
 (9)

这里 $N(R<r)$ 为间距小于 r 的分布点的累计值, D 为一般的豪斯道夫维,可称为分数维。如果把距离 r 和 $N(R<r)$ 的数据标成双对数图像,则在具有分形构造的部分(无标度区),即满足(1)式的部分表现出线性。图 6 是以纵轴为 $N(R<r)$,横轴为 r 作出的南北带硅热流值的基准值与频度的关系对数图象。数据显示出直线性,这就可以理解为硅热流值的空间分布属于分形构造,并且可以通过图形的斜率求出分数维 D 。

由此,我们求出了南北地震带硅热流值空间分布的分数维(表 1)。

表 1 不同范围的硅热流值及其对应的分数维值

硅 热 流 值	分 数 维
小于 50 mWm ⁻²	1.952
50—80mWm ⁻²	1.487

图 6 中的 A 线和 B 线分别表示硅热流值小于 50 mWm⁻²的和 50—80 mWm⁻²的 $N(R<r)-r$ 双对数关系,可以算出其分数维值分别为 1.952 和 1.487。

现在看一下它们的含义。在 2 维空间中,分维为 2,这意味着硅热流值在 2 维空间中的分布是均匀的。热流值小于 50 mWm⁻²时的分数维为 1.952,接近于 2,表明它在 2 维空间中的分布基本上是均匀的。热流值在 50—80 mWm⁻²之间的分数维为 1.487,远小于 2,意味着在空间系统中存在着使均匀分布受到破坏的那种吸引子,因此均匀分布被破坏,分布向着集中化分布发展。由第二节知道,50—80 mWm⁻²之间的硅热流值形成两个簇状,一个在固原一带,另一个在四川九龙一带。

这种现象可以作如下解释:地下深处的二氧化硅含量与某种活动相互作用,而分数维的变化是这种相互作用的函数形式或强度变化产生的结果。这里的“某种活动”不一定是构

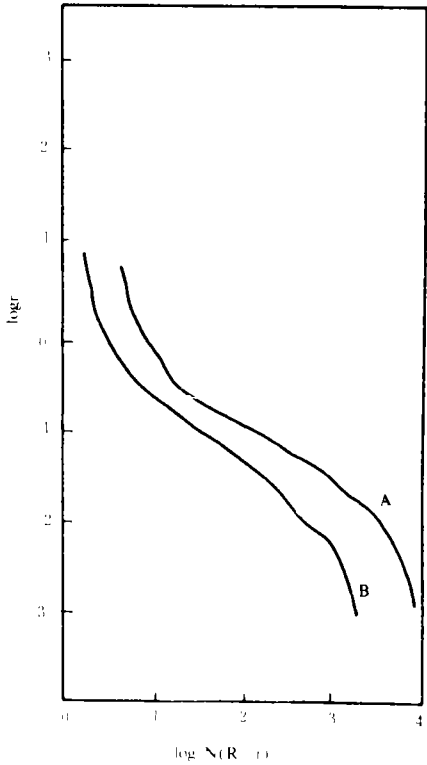


图 6 基准值 r 与 $N(R<r)$ 的关系

Fig. 6 Relation between standard value r and frequency $N(R<r)$.

造活动,其它过程如化学相变,地表水的渗入,地下水中化学组分的迁移等都可引起二氧化硅含量的变化。从二氧化硅本身的地球化学特性来看,岩石破裂导致岩石和地下水接触面积的增大,是二氧化硅含量升高的一个主要原因。从南北地震带的情况来看,地质构造和二氧化硅分布吻合很好,因此至少可以说其构造活动是引起硅热流值变化的主要原因之一。

3 结语

SiO₂ 地温计毕竟是一个统计性的经验方法,满足这一方法的前提条件较为复杂,因此由这一方法得出的结果较为粗略。本文通过南北地震带硅热流值得出其趋势分析和分维空间分布特征,探讨了硅热流值和构造活动之间的内在联系,得出了较为满意的结果。因此,硅热流值在勾画大地热流值的轮廓,探讨构造活动趋势以及在目前经费紧张的情况下为传统大地热流测试进行前期工作等方面有一定的价值,不失为一方便有效的热流研究方法。

参考文献

- 1 Swanberg, C. A. and Morgan, P. The silica heat flow interpretation technique: assumptions and applications. *Pur. Appl. Geophys.*, 1978, 117: 227—241.
- 2 Morgan, P. The study of silica heat flow in Northern America. *Phys. Chem. Earth*, 1984, 15: 107—193.
- 3 张知非. 川西硅热流. *大自然探索*, 1987, (6): 130—135.
- 4 齐腾正多. *数理地震学*. 地震出版社, 1990.

SILICA HEAT FLOW VALUES AND THEIR FRACTAL PROPERTY ALONG THE NORTH—SOUTH SEISMIC BELT

Wang Fei

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

By using quartz thermometer and the experiential formula $q_{\text{SiO}_2} = (T_{\text{SiO}_2} - b)/m$ given by C. A. Swanberg and P. Morgan in 1980s, this paper studies the silica heat flow values along North-South seismic belt, and analyses their trend and fractal property. In contrast to geological background, the paper also discusses the relationship between silica heat flow values and tectonic activities and prospects of application of silica-heat-flow method.

Key words: Fractal, North-South tectonic belt, Active fault, Geothermal flow, Silica heat flow value