

华南沿海温泉成因探讨^{*}

张珂, 马浩明, 蔡剑波

(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘要: 首先分析了华南沿海温泉成因, 排除该区多数温泉具局部衰变热、岩浆残余热、断层活动热成因的可能性。重点讨论了地下水深特循环的动力学模型, 分析了地下水循环深度(相当于张性断层的规模)和水头压力(相当于地形反差)对泉温和流量的控制作用, 并把泉温和流量与理论计算曲线对比, 从而得出华南温泉为深循环的成因的结论。分析还得出, 较大地形反差和张性大断裂是温泉形成的两个有利条件, 如果仅具备其中一个条件, 那么张性大断裂(小地形反差)比大地形反差(小断裂)更有利于获得较高泉温。可见, 温泉深循环的动力学模型对华南沿海地热资源的预测、开发和利用有一定的指导意义。最后, 简要讨论了温泉与地震的关系。

关键词: 温泉成因; 地下水深循环; 华南沿海

中图分类号: P314 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579(2002)01-0082-05

本文所指的华南沿海包括沿海的粤、闽南、桂东南以及湘、赣两省的南部。该区温泉资源非常丰富, 其数量可与云南、西藏等著名地热区媲美。与地震不同的是, 温泉常年流淌, 不断提供新构造活动的信息, 其成因及其与地震关系的研究对深化新构造运动有着重要的意义。关于华南沿海温泉的成因, 有元素衰变热、岩浆残余热、断层活动热以及地下水深循环热等诸多不同的观点。有的学者认为华南沿海的温泉可能有着多种成因。本文在对上述观点简要分析的基础上, 试对华南沿海温泉的深循环成因作进一步的分析讨论, 进而探讨与地震关系等与新构造运动有关的问题。

1 华南沿海温泉成因分析

1.1 元素衰变热

如果温泉的形成与因局部放射性元素富集而产生的地热异常有关的话, 那么温泉应当多分布在铀、钍等放射性元素的相对富集区。然而情况却非如此。大多数温泉分布区铀钍含量普遍低于全球的平均值; 而许多铀钍富集区却不见温泉的分布^[1]。虽然不能排除少量温泉会受放射性元素的局部富集所产生的热异常影响而获得更高的泉温, 但局部放射性元素异常生热的观点可能与本区的大多数温泉情况不符。

1.2 岩浆残余热

华南沿海地区广泛出露燕山各期花岗岩, 出露最多的是燕山三期花岗岩, 最晚的是燕山五期花岗岩, 后者的同位素年龄一般在70~80 Ma之间, 这些岩浆冷凝固结至今是否留有残余热呢? 从目前所掌握的资料看, 华南沿海温泉与燕山五期花岗岩并没有明显的相关关系, 因为两者没有空间上的联系。如果说最后一期岩浆热已经丧失殆尽的话, 那么更早的花岗岩更是无热残留了。所以岩浆残余热的可能性也很小。

1.3 断层活动热

不少温泉沿断层带分布, 难免会产生温泉热来自断层活动的认识。但断层活动究竟能产生多少热? 假定断层带物质的粘度为 $1.021 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 断层的平均滑移速度为 1 mm/a , 计算结果(计算原理及方法参见文献[2])表明: 断层运动的升温仅为 0.03°C 。显然断层运动不可能给温泉的形成提供足够的热源。我国西北的断层活动比华南沿海地区强烈得多, 但温泉数量却少得多, 便是上述现象的佐证。

1.4 地下水深循环

曾有学者注意到, 温泉的水温与山体的高度有一定的正相关关系。例如沿莲花山脉从北东往南西方向, 山体高度由1600 m多下降至500~600 m, 温泉的水温也随之下降, 分别由丰良 93°C 的最高水温下降到宝安 29°C 的最高水温^[3]。我们还注意

* 收稿日期: 2001-04-10;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49871013)

作者简介: 张珂(1957—), 男, 副教授; E-mail: eeszke@zsu.edu.cn

到，华南沿海地区的温泉多出露于山地与平原的交接地带，而且温泉水温与地形的关系较密切：不少泉温高、流量大的温泉分布在地形反差大的地方。然而，温泉分布与热流值高低的关系并不十分密切，尽管高热流对温泉的形成是有利的，但许多高热流区如雷琼地区却无高温温泉出露；相反的例子也有不少。此外，华南沿海温泉的水质一般以重碳酸—碳酸钠型或钠钙型为主，矿化度偏低；温泉水的同位素特征与大气降水相似^[4]。上述现象暗示华南沿海温泉与地表水深循环有关。这与中国其他一些地方的温泉形成类似^[3]，许多温泉水量受季节性的影响便是佐证。由于地热增温率的存在，只要地下水的循环深度较大，都可能成为温泉。

假定地下水沿半径为 R' 的圆弧形含水层作层流流动（图 1），含水层横截面呈圆形，半径为 R ，温泉的水头压力为 ρgb （ b 为进水口和出水口的高差， ρ 为水的密度），在距进水口 s 处使地下水运动的压力梯度为：

$$\frac{dp}{ds} = -\frac{\rho gb}{\pi R'} \quad (\text{因为 } R' \gg b) \quad (1)$$

其流量 Q 为^[2]：

$$Q = \frac{\pi R'^4}{8\mu} \cdot \frac{dp}{ds} \quad (2)$$

联立 (1)、(2) 两式得：

$$Q = \frac{\rho gb R'^4}{8\mu R'} \quad (3)$$

或
$$\bar{u} = \frac{\rho gb R'^2}{8\mu \pi R'} \quad (4)$$

式中 $\bar{u}$ 为平均流速， μ 为地下水粘度。

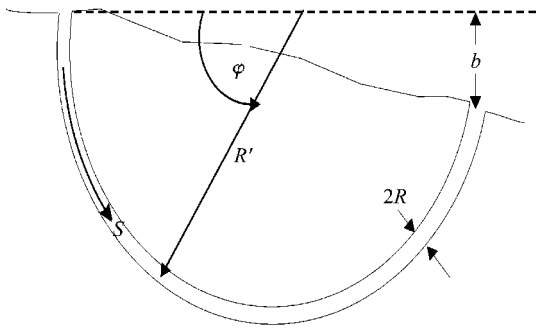


图 1 半圆形含水层的剖面，其中水头高度为 b
Fig 1 A semicircular aquifer with a circular cross section
A hydrostatic head b is available to drive the flow

显然在 R 与 R' 不变的情况下， Q 与 b 或 $\bar{u}$ 成正比。

如果考虑含水层中水流与其围岩的热平衡，则有^[2]

$$\pi R^2 \rho c \bar{u} \frac{d\bar{t}}{ds} = 2\pi R h (t_w - \bar{t}) \quad (5)$$

式中 c 为比热， $\bar{t}$ 为平均水温， t_w 为围岩温度， h 为热传导系数，

又因为地下水循环最深处的围岩温度：

$$t_w = t_0 + R' \beta \sin \varphi \quad (6)$$

式中 β 为地热增温率（取 30°C/km ）， t_0 为地表温度（取 20°C ）。

以方程 (6) 为条件，解方程 (5) 得：

$$\theta_e = \frac{[\exp(-\frac{48}{11} \cdot \frac{R' \pi}{R P_e}) + 1] \frac{48}{11} \cdot \frac{R'}{R P_e}}{1 + (\frac{48}{11} \cdot \frac{R'}{R P_e})^2} \quad (7)$$

式中，

$$\theta_e = (t_e - t_0) / \beta R' \quad (8)$$

式中， t_e 为地下水出口处的温度（即泉温），

由于 Peclet 数 P_e 为^[2]：

$$P_e = \frac{R \bar{u}}{\kappa} \quad (9)$$

式中，热扩散系数 $\kappa = 1.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ，如果把 P_e 改写为：

$$P_e = \frac{R \bar{u}}{\kappa} = \frac{Q}{\pi R^2} \cdot \frac{R}{\kappa} = \frac{Q}{\pi \kappa R} \quad (10)$$

代入 (7) 式得：

$$\theta_e = \frac{[\exp(-\frac{48}{11} \cdot \frac{R' \pi^2 \kappa}{Q}) + 1] \frac{48}{11} \cdot \frac{R' \pi \kappa}{Q}}{1 + (\frac{48}{11} \cdot \frac{R' \pi \kappa}{Q})^2}$$

R' 代表地下水循环的最大深度，设 R' 分别等于 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 km，计算出不同流量下的温泉水温变化（见图 2）。

图 2 中可见，不论地下水循环深度多少，温泉水温均存在最大值。最大值左侧，泉温随流量的增加而急剧升高；最大值右侧，泉温随流量的增加而缓慢降低，泉水最高温度大约是地下水循环最深处（ $= R'$ ）地温的一半。

从式 (3) 和 (4) 可见，在 R 和 R' 不变的情况下，流量 Q 、水头高度 b 和平均流速 $\bar{u}$ 三者成正比。所以，图 2 横坐标既代表了流量，同时也反映了地下水的平均流速和水头（即高差）的大小。高差小，流量小，流速慢，有足够的热传导时间，地

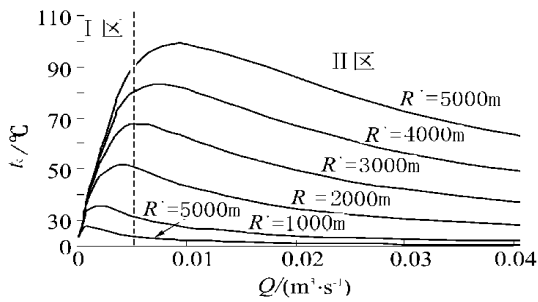


图 2 地下水流量 (Q)、循环深度 (R') 与泉温 (t_e) 的关系

Fig. 2 The relationship between discharge (Q), depth of cycle (R') of underground water and temperature of spring (t_e)

下水温度可以接近围岩的温度，但上升的时间长，途中已逐渐降温，所以泉温较低；高差大，流量大，流速快，虽然散热的时间很短，但地下水在深部还没有来得及通过热传导而升到足够的温度就流出地表了，所以泉温也不高。可见，形成温泉必须要有合适的水头压力，即必须要有合适的地形反差。从图 2 中还可可见，随 R' 的增大，地下水循环深度的增加，泉温极值点也同时向右和向上偏移，一方面反映随地下水循环深度增加而使泉温升高，另一方面也反映达到泉温极值点的地形反差增大。

由上可见，温泉的形成至少要满足 2 个基本条件：①合适的水头压力而保证得到合适的流速；②较深的地下水循环而获得较高的温度。前者要求合适的地形反差，后者要求较大规模的张性断层。

假定以 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ 界把图 2 分成 I、II 两区，I 区温泉流量较小，流速较慢，地形反差较小；II 区温泉流量较大，流速较快，地形反差较大。在 I 区的下方，断裂规模和地形反差均小，这里的泉温很低；在 II 区的下方，断裂的规模小，但地形反差大，这里的泉温也不高；而在 I 区的上方，断裂的规模大，但地形反差小，此处的泉温明显高于小断裂小地形反差 (I 区下方) 的泉温；在 II 区的上方，断裂规模大，地形反差也较大，此处允许达到极值温度的地形反差也大，泉温也最高，是温泉形成的最有利条件。如果只满足上述温泉形成的两个基本条件中的一个，从图 2 中还可可见，从理论上说，大断裂小地形反比比小断裂大地形反差更有利于获得较高温的温泉。

实际情况比上述理论计算要复杂得多，因此测量值与理论计算值会有很大的偏差，偏差的原因主要有：①地下水不可能沿理想的圆弧形的圆管进行

深循环；②层流和紊流可能同时存在；③围岩温度不能简单地等同于地温，围岩温度同时受地温、岩性及地下水流速和流量的控制；④浅部较冷水的混入使泉温降低；⑤泉眼分散，所测得的流量偏低；⑥局部的地热异常干扰；等等。因素 4 可能就是石灰岩地区温泉较少的原因，因为即使在石灰岩地区满足了高地形反差和张性深大断裂两个条件，但浅部地下水丰富，深循环水上升途中，已经被较冷水加入而冷却了。所以，在对温泉资料进行分析时，如果同一区域存在多个温泉，要尽量选取水温最高和流量最大的温泉作为代表，这样可望减少因素④和⑤的影响。

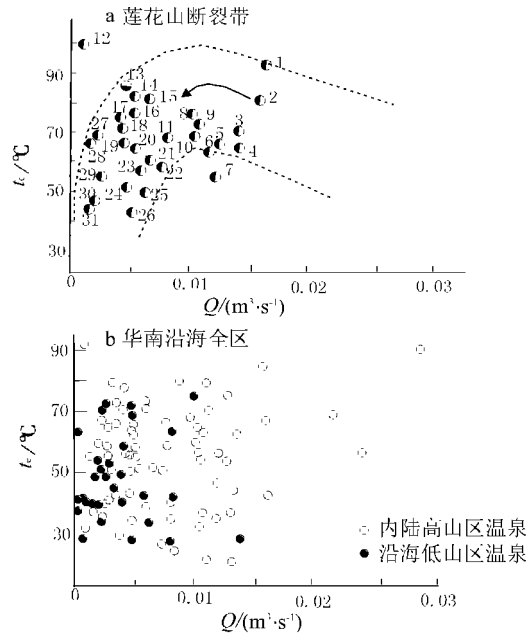


图 3 华南沿海温泉的流量和泉温分布 (原始资料来自文献 [5])

Fig. 3 The discharge and temperature of hot spring along the coast of South China

(a) 中的号码分别表示：1. 丰顺丰良，2. 南靖山前，3. 连城汤头，4. 连城新泉，5. 平和山格宫子，6. 永定龙山，7. 陆河河田，8. 永安洪田，9. 紫金九和，10. 惠东安墩，11. 兴宁泥坡，12. 潮州东山，13. 丰顺邓屋，14. 揭西汤埔，15. 兴宁叶塘，16. 丰顺城关，17. 五华转水，18. 永定下洋，19. 饶平杨康，20. 华安沙建，21. 五华横波，22. 揭西五经富，23. 普宁南阳，24. 惠东多祝，25. 惠东新庵，26. 梅县大坪，27. 普宁惠城，28. 海丰公平，29. 陆河河田，30. 普宁南阳，31. 陆河河田

按照以上原则把华南沿海地区的温泉泉温和流量投入泉温 (t_e) 和流量 (Q) 的坐标中 (图 3)，

其中图3a为莲花山断裂带的温泉, 由于莲花山断裂带的断裂规模南北差别不会太大, 但地形却从北东往南西、从内陆往沿海逐渐降低, 所以在 t_e 、 Q 座标图中温泉点也大致呈带状沿减少流量和降低泉温的方向(图3a中的箭头方向)迁移, 泉温高、流量大的温泉多分布于闽粤两省交界一带的大山和高山区, 泉温较低、流量较小的温泉则多分布于莲花山断裂带东南一侧的沿海低山区(图3a)。此外, 沿莲花山断裂分布的大部分温泉点多位于在最高水温极值点的左侧, 所以多表现出泉温随地形的升高而上升的规律。在图3b中, 流量小于 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ 的温泉多分布在沿海低山区(用实心圆表示); 而流量大于 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ 的温泉则多分布于内陆高山区(用空心圆表示)。反映流量的大小在一定程度上可以反映地形的高低, 但由于断裂的规模、切割深度在不同地区变化很大, 所以上述温泉的温度区间较宽, 变化较大, 不呈带状分布。

图3a、b两例进一步说明, 尽管存在这样那样的偏差, 华南沿海地区大部分温泉是地表水经深循环之后形成的。这些温泉在 t_e 、 Q 座标图中的分布与理论计算曲线相似, 说明其成因基本上符合文中的地下水深循环的动力学模型, 即温泉主要的控制因素为张性断裂的规模(切割深度)及地形反差的高低(水头压力的大小), 前者控制了温泉可能达到的最高水温(大约为最深部地温的一半); 后者控制了温泉的流量及泉温的变化, 两者均为与研究区温泉形成具一一对应关系的变量。根据上述对华南沿海地区温泉成因的认识, 有可能预测天然温泉产出的有利部位, 从而指导地热资源的开发利用。例如, 在小地形反差和深大断裂地带条件下, 尽管深部水温很高, 但因深循环的地下水流速慢, 所以出口处泉温低。然而, 是否可以通过打深钻和抽水, 人为地增加地下水的流速而提高泉温? 值得今后进一步研究和探索。如果此法可行, 有望在没有温泉出露的地方通过钻井获得温泉。

2 华南沿海温泉与地震的关系

在温泉成因明了后, 再来讨论温泉与地震活动的关系就不太困难了。不少学者都注意到温泉与地震有负相关关系^[7], 即温泉多的地方大震少; 温泉少的地方大震多。有的学者由此得出地壳运动的能

量释放形式分为热能和机械能两种, 两者有互补关系。但通过上述讨论, 我们认为, 无论释放热能还是机械能, 都只是表象, 根本原因是控制温泉的断层以张性为主, 控制大震的断层以压性为主; 前者主要为蠕滑, 后者主要为粘滑; 前者通透性较好, 不积累大的应力; 后者的封闭性较强, 积累的应力较强。

华南沿海现今主压应力方向为NWW SEE方向, 在这种应力下, 北西向断层以张扭性活动为主; 而北东向断层以压扭性活动为主, 所以, 泉眼多受北西向断层控制, 使温泉沿北西向成群出现; 而大地震则多受北东向断层的控制。另外, 在北东和北西两组断层交会部位, 也因交切方式的不同分别出现局部拉张或挤压, 局部挤压区可能控制地震, 局部拉张区则可能控制温泉^[8]。由于华南沿海地区北东向断层规模宏大, 与一系列北西向断层的交汇点构成了北东向排列的条带, 所以, 温泉在空间上也有北东排列的趋势。当然, 由于华南沿海地区挤压应力的强度不大, 北东向断层的不少段落仍可以表现出一定的张性, 加上山地众多, 所以温泉等地热资源非常丰富。

本文写作中, 陈国能教授提出了不少宝贵意见, 在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 黄坤荣. 华南沿海地区温泉热释放与地震的关系[J]. 华南地震, 1983, 3(4): 18—29.
- [2] TURCOTTE, K L SCHUBERT G. Geodynamics, applications of continuum physics to geological problems[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1982: 134—422.
- [3] 陈定国, 姚梅尹. 莲花山南段的地震和构造[J]. 华南地震, 1984, 4(1): 42—51.
- [4] 魏柏林. 广东省地震构造概论[M]. 北京: 地震出版社, 2000: 37—43.
- [5] 李学伦, 孙效功, 王永红. 山东半岛温泉的分布规律与成因[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(3): 389—396.
- [6] 张虎男, 陈伟光, 黄坤荣, 等. 华南沿海新构造运动与地质环境[M]. 北京: 地震出版社, 1990: 附录8—21.
- [7] 王春林. 华南地区温泉、地震和活动性断裂关系研究//中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断裂[M]. 北京: 地震出版社, 1982: 190—195.
- [8] 黄玉昆, 张珂. 广东莲花山断裂带新构造运动特征研究[J]. 华南地震, 1990, 10(2): 25—34.

Discussion on the Origins of Hot Spring along the Coast of South China

ZHANG Ke, MA Hao ming, CAI Jian bo

(Department of Earth Science, Sun Yat-sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Several opinions about hot spring origin along the coast area of South China are analyzed firstly, in which the opinions of decay heat of local enriched radioactive elements, remnant heat of magma, friction heat of fault slip to most hot springs are excluded. Then the dynamic model of deep cycle of underground water is adopted and discussed emphatically. According to the model, two controlling factors, namely cycle depth (equivalent to the dimension of tensional faults) and water head (equivalent of the topographic contrast), to temperature and discharge of hot springs are analyzed. And still the temperatures and discharges of hot springs in the studied area are correlated to those calculated by the model. The similarity between them also supports the opinion of deep cycle of ground water. Thus, the best conditions for the formation of hot spring are relatively high topography contrast and deep tensional faults. The situation of deep tensional faults with low topographic contrast is better than that of small faults with high topographic contrast in getting higher temperature of hot spring according to the model. It can be seen that deep cycle dynamic model of underground water has particular significance to the prediction and exploration of hot spring in the studied area. The relationship between hot springs and seismic activities is also discussed.

Key words: the origin of hot spring; deep cycle of underground water; the coast of South China