

马玉川, 黄辅琼, 薛艳, 王博, 2015. 泉水和井水温度长期观测资料的初步统计. 震灾防御技术, 10 (2): 367—377.
doi: 10.11899/zzfy20150217

泉水和井水温度长期观测资料的初步统计¹

马玉川 黄辅琼 薛艳 王博

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要 依据中国地震台网中心前兆数据库中的水温数据, 绘制了中国大陆用于地震监测预报的泉水温度分布图以及井下 50—149m 和 150—250m 的水温分布图, 统计了人工和数字化观测水温中长期趋势性上升或下降的测点, 分析了数字化观测水温长期趋势性变化的原因。结果表明, 泉主要分布在川滇、青藏高原东北缘、中天山、郯庐断裂带及邻区、北京西北和福建沿海等地, 这些泉与断裂构造具有较好的空间相关性; 其中水温大于 25℃ 的温泉多分布在中强地震多发区; 井水温度的空间分布具有北方地区水温低于南方地区、小区域内的温差不显著等特征, 其主要受控于气候因素; 井下 150—250m 与 50—149m 水温相比, 符合随深度增加水温升高的地热规律; 人工观测水温中 10% 为客观的长期趋势性变化; 数字化观测水温中 24% 为长期趋势性变化, 其中一部分是水温的客观反映, 另一部分是水温仪零飘的反映。

关键词: 泉井 水温 长期变化 地震 零飘

引言

泉水和井水温度观测是中国地震地下流体监测台网的第二大测项, 目前已初具规模, 并记录到了一些有价值的地球动力学信息, 包括地震前兆异常、同震和地球固体潮效应等。同时, 泉水和井水温度观测在地震监测预报及地球科学研究中的应用也非常广泛。然而, 目前还存在一些有待解决的基本问题, 数字化水温仪的长期稳定性是问题之一(车用太等, 2013)。有学者对这一问题进行过分析, 如邱永平(2011)对宁波地震台 ZK03 井水温的平行观测表明, 该井水温 10 年来的长期趋势性上升的原因不是井水温度的变化, 可能是水温仪飘移所致; 车用太等(2013)汇总了水温趋势性变化的相关统计, 结果表明约有超过统计数三分之一的水温动态为趋势性上升或下降, 其中一些可能与水温仪的零飘有关。因此, 进一步分析数字化水温仪记录的长期趋势性变化的原因, 对科学使用水温数据和提升水温观测技术有借鉴意义。

基于中国地震台网中心前兆数据库中的水温数据, 本文介绍了用于地震监测预报的水温观测情况, 统计了人工和数字化观测水温中长期趋势性上升或下降的测点, 对比了数字化和人工观测水温的统计结果, 重点探讨了数字化观测水温长期趋势性变化的原因。

1 基金项目 财政部公益性行业科研专项(201308006)、中国地震局 2014 年度震情跟踪专项工作任务(2014010504)、中国地震局 2015 年度震情跟踪专项工作任务(2015010308)

[收稿日期] 2014-10-13

[作者简介] 马玉川, 男, 生于 1985 年。硕士, 助理研究员。主要从事地震地下流体动力学研究。E-mail: mayuchuan@seis.ac.cn

1 用于地震监测预报的水温观测

中国地震台网中心前兆数据库中的水温数据,按观测系统分为人工、模拟和数字化观测三类。其中,人工观测始于 20 世纪 70 年代,一部分是水氢的辅助测项,另一部分是地震前兆测项(如四川的泉水温度观测)。观测员为地震台站人员或临聘当地人,他们每日定时在泉或井水中用精度约 0.1°C 的水银温度计测温一次,然后上报省局,省局将数据录入前兆数据库。模拟观测始于 20 世纪 80 年代,观测系统由国家地震局地壳应力研究所研制,在一定深度的井或泉水中安装温度传感器后,精度优于 0.05°C 的水温仪每小时测温一次后将数据打印在记录纸上,台站人员定期保存和更换记录纸便可完成连续观测,其中模拟观测在川滇和首都圈等地进行一定规模和时间的试验观测后,经数字化升级后在全国推广。数字化观测始于 21 世纪初,观测精度优于 0.05°C ,数据采样率为 1 次/分,数据通过网络自动传输,观测系统由中国地震局地壳应力研究所、中科广大和泰德公司等研制。目前中国地震台网中心前兆数据库中每日更新的水温数据主要为人工和数字化观测,数量约 90 和 380 个。

依据这些井孔数量和观测时间均有积累的水温数据,给出了用于地震监测预报的泉水和井水温度的空间分布图。泉水温度空间分布图的绘制涉及温度分类、测温点、泉群归类、泉水温度取值等问题。其中,温度分类采用陈墨香(1992)的方法,即小于 25°C 为冷泉, 25°C 以上为温泉,温泉又可分 $25\text{—}40^{\circ}\text{C}$ 、 $>40\text{—}60^{\circ}\text{C}$ 、 $>60\text{—}80^{\circ}\text{C}$ 和 $>80^{\circ}\text{C}$ 四个温级。测温点绝大多数在泉眼,个别改造过的数字化观测泉的温度传感器置深较浅,约数米,如河北三马坊和涿鹿矾山、宁夏石嘴山北简泉等,对这些泉及其水温均做了统计。对于泉群,如云南龙陵邦腊掌、腾冲热海和荷花大滚锅以及四川理塘毛垭、乡城然乌泉群等,按一个泉来统计,泉群水温采用主泉水温值。泉水温度采用多年观测值的均值,数据不完整的用近期均值,以 1°C 为最小有效数值。按照以上方法,共收集到 85 个泉,包括 53 个冷泉和 32 个温泉。其中, $4\text{—}9^{\circ}\text{C}$ 冷泉 10 个, $10\text{—}14^{\circ}\text{C}$ 冷泉 18 个, $15\text{—}19^{\circ}\text{C}$ 冷泉 17 个, $20\text{—}24^{\circ}\text{C}$ 冷泉 8 个; $25\text{—}40^{\circ}\text{C}$ 温泉 9 个, $>40\text{—}60^{\circ}\text{C}$ 温泉 12 个, $>60\text{—}80^{\circ}\text{C}$ 温泉 8 个, $>80^{\circ}\text{C}$ 温泉 3 个。这些泉的空间分布及其水温如图 1 所示,图中断裂数据来自邓起东(2007)主编的“中国活动构造图(1:40000000)”。由图 1 可以看出,这些泉主要分布在川滇、青藏高原东北缘、中天山、郯庐断裂带及邻区、北京西北和福建沿海等地,同时这些泉与断裂构造具有较好的空间相关性,其中温泉主要分布在中强地震多发区。

井水温度空间分布图的绘制涉及资料选用、深度分段、温度分类、井水温度取值等问题。资料选用数字化观测数据,因为数字化与人工观测相比,具有明确和固定的测温深度;按照观测点统计资料,因为一些井孔不同深度有多个温度传感器,如北京昌平台,辽宁鞍山台,黑龙江五大连池台,浙江宁波台,海南海口、迈仍村、向荣村台,江苏金湖苏 06 井,四川西昌川 32 井,甘肃古浪横梁、景泰芦阳、平凉 C11 井和清水温泉井等;从 380 个数字化观测点中收集到 323 个有温度传感器置深资料的测点,这些测点绝大多数在水中,个别在淤泥、干井和井内空气中(如北京昌平台和青海西宁井等),统计时未将在淤泥、干井和井内空气中的测点剔除,因为笔者不清楚大多数井的内部状态。

上述这些测点的温度传感器置深情况如图 2 所示。从图中可以看出,温度传感器置深范围为 $0.5\text{—}800\text{m}$,其中 $0.5\text{—}250\text{m}$ 的测点占大多数。综合考虑温度传感器的置深情况以及温度传感器置深较浅的测点中有一部分是自流热水井,太阳辐射热影响的深度情况等,笔者分井下 $50\text{—}149\text{m}$ 和 $150\text{—}250\text{m}$ 两个深度段绘制水温空间分布图。

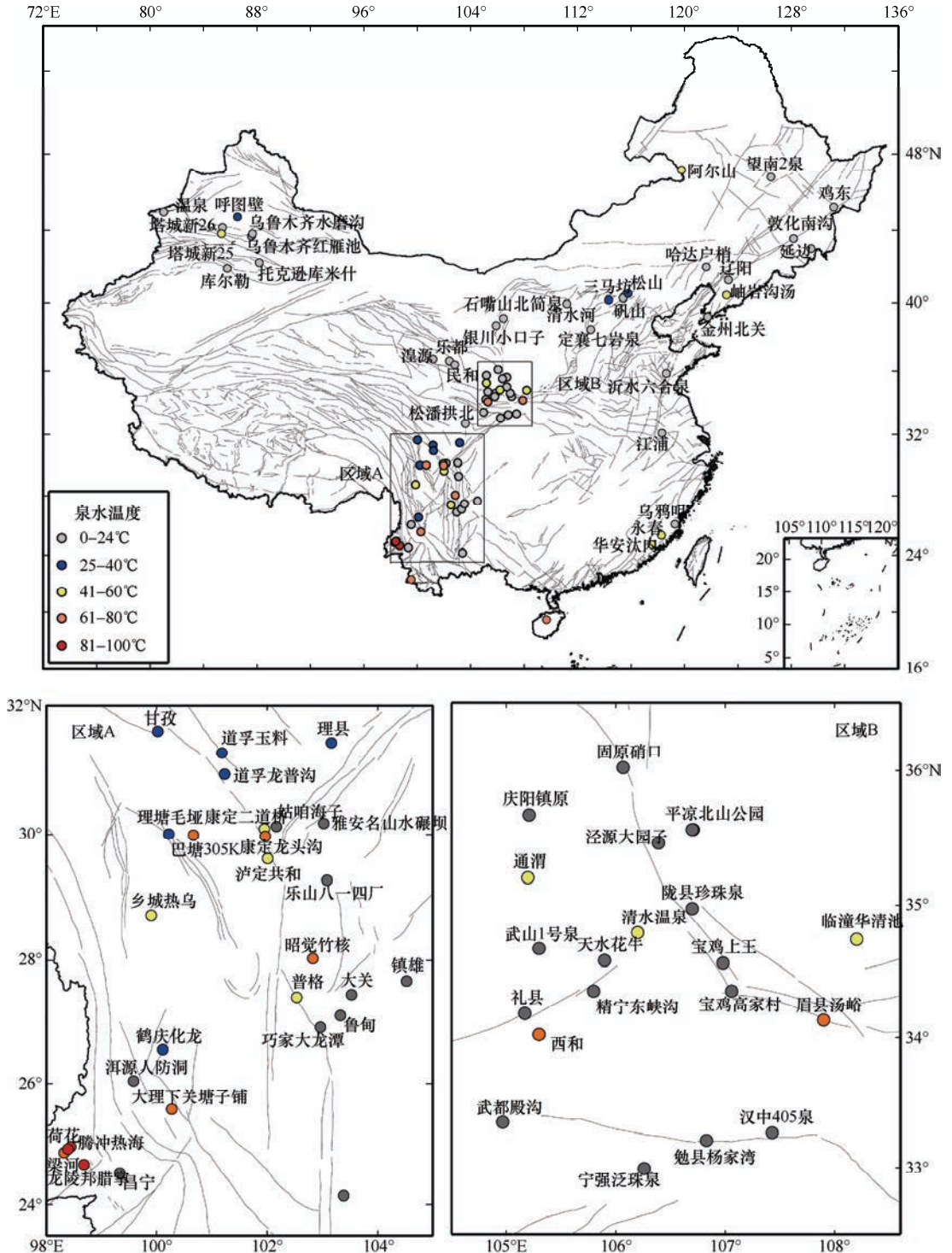


图 1 用于地震监测预报的部分泉点及其水温

Fig. 1 Distribution of springs and their water temperatures in the Earthquake Precursor Monitoring Network of China

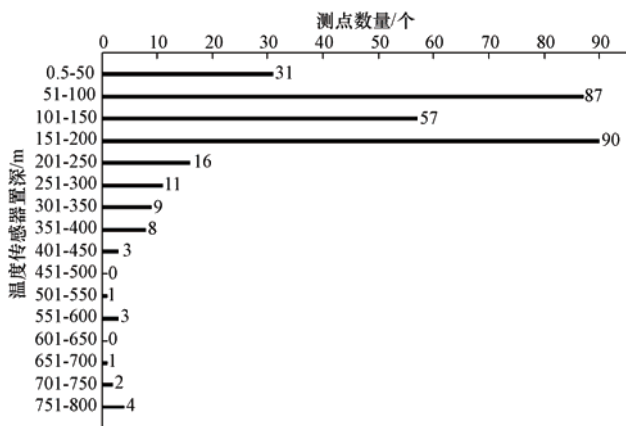


图2 部分数字化水温观测井的温度传感器置深情况

Fig. 2 Depths of thermometers in the wells for automatic record of water temperature

鉴于通常的地温梯度为 $1\text{—}3^\circ\text{C}/100\text{m}$ ，以 10°C 为步长划分温度段，可以避开地温梯度的影响。井水温度采用多年观测值的均值，数据不完整的用近期均值，以 1°C 为最小有效数值。按照以上方法，笔者绘制出了井下 $50\text{—}149\text{m}$ 和 $150\text{—}250\text{m}$ 的水温分布图，如图 3 所示。从图中可以看出，这些井水温度测点的空间密度偏低，但整体呈现出北方地区水温低于南方，小区域内的温差并不显著等特征，主要受控于气候因素；井下 $150\text{—}250\text{m}$ 与 $50\text{—}149\text{m}$ 水温相比，符合随深度增加水温升高的地热规律。

2 水温长期趋势性变化资料的统计

以中国地震台网中心前兆数据库中的水温数据为样本，笔者分别统计了人工和数字化观测水温资料中有 5 年以上趋势性变化的测点。

2.1 人工观测水温的统计结果

在全国 90 个人工观测点中，大多数表现为年变、突升突降和波动变化，少数为长期趋势性变化。后者的数量为 9 个，占 10%，其中：有 8 个下降，包括山西夏县和奇村、河南安阳、福建漳州、陕西眉县、四川姑咱二道桥、西昌新村和西昌太和；有 1 个上升，为陕西临潼。这 9 个测点的水温变化幅度差异较大，最大的是河南安阳，其年变幅为 2.1°C ；最小的是四川西昌新村，其年变幅为 0.015°C 。这些测点的水温变化速率有波动，不是持续的上升或下降，如图 4 所示。

2.2 数字化观测水温的统计结果

在全国 380 个数字化观测点中，大多数表现为波动、突升突降和年变化，少数为长期趋势性变化。后者的数量为 92 个，占 24%，其中，有 74 个上升，18 个下降，上升比下降的数量多。这些测点的分布范围较广、分布较分散、无显著的空间特征。其水温变幅多为 $0.01\text{—}0.099^\circ\text{C}/\text{年}$ ，占比为 65.22%；水温变幅为 $0.0010\text{—}0.0099^\circ\text{C}/\text{年}$ 的占比为 31.52%；水温变幅为 $0.1\text{—}0.2^\circ\text{C}/\text{年}$ 的占比为 3.26%，如图 5 所示。这些测点的水温表现为持续上升或下降，按照变化速率可分为匀速型和变速型两类，如图 6 所示。其中，匀速型的有 48 个，变速型的有 44 个，匀速型和变速型的数量相当。笔者的统计结果与车用太等 (2013) 的汇总结果相比，相同点是水温长期趋势性变化的年变幅多为 $0.01\text{—}0.1^\circ\text{C}$ ；不同点是水温长期趋势性变化的比例不一致，车用太等 (2013) 汇总的比例约占 $1/3\text{—}2/3$ ，而笔者的统计比例约占 $1/4$ 。这可能与统计时间的选取不同有关。

2.3 数字化观测与人工观测的统计结果对比

数字化观测水温与人工观测水温的统计结果不一致。首先，数字化观测水温的长期趋势性变化的比例高于人工观测，数字化观测占比为 24%，而人工观测占比为 10%；其次，

数字化观测水温的长期趋势性上升比下降的数量多，而人工观测中下降比上升的数量多；再者，数字化观测水温的趋势性变化特征比人工观测更具规律性。这主要体现在两方面：一方面是数字化观测水温多为持续的上升或下降，即表现为匀速型和变速型两类；另一方面是数字化观测水温中有长期趋势性变化测点的水温年变幅较小，而人工观测在这两方面的规律性不显著。

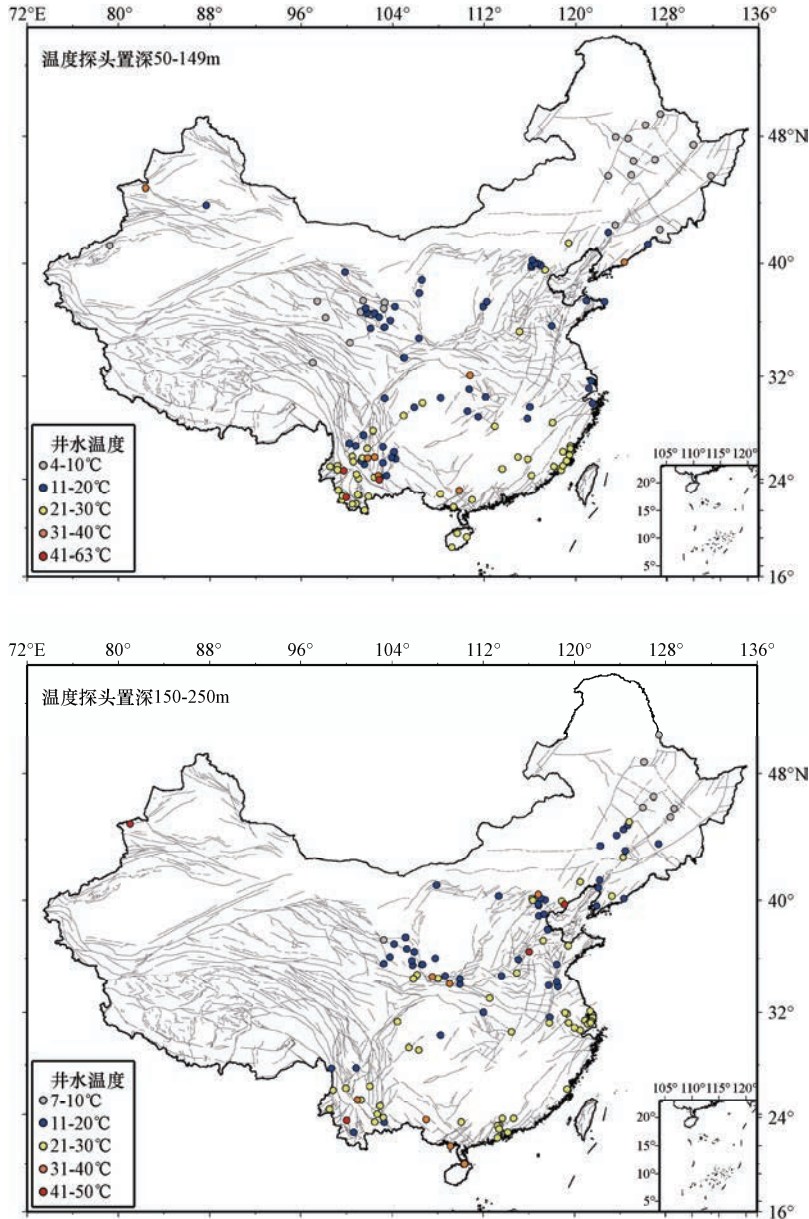


图3 井下50—149m(上图)和150—250m(下图)水温的空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of well water temperature at depth range of 50-149m (top) and 150-250m (bottom)

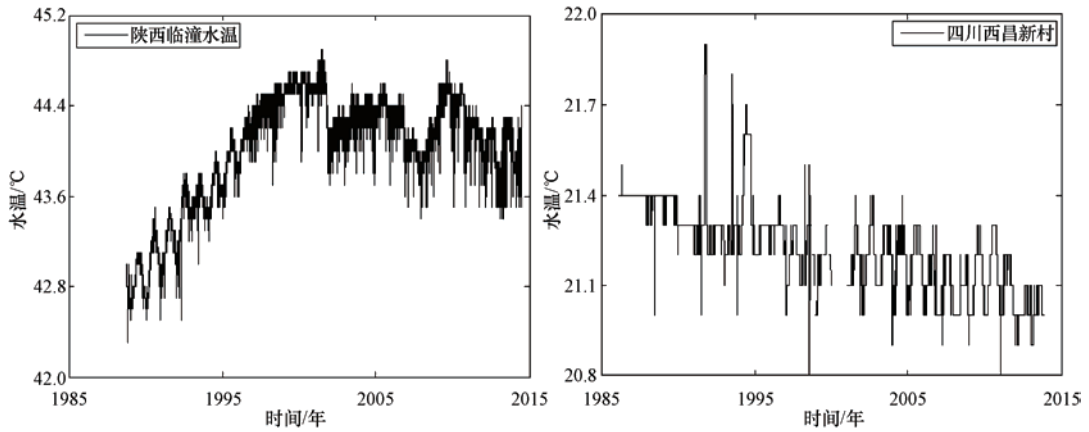


图 4 人工观测水温中长期趋势性上升（左）或下降（右）典型曲线

Fig. 4 Typical curves of long-term rising (left) and falling (right) from manually recorded water temperature data

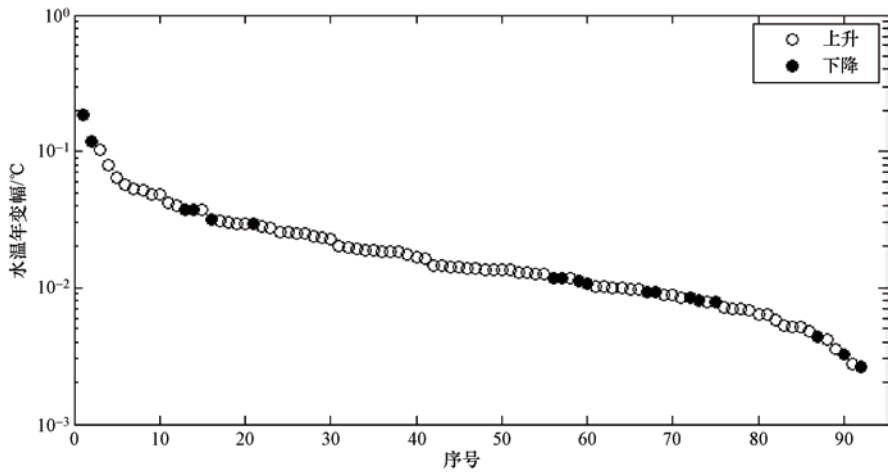


图 5 数字化观测水温中长期趋势性变化测点的年变幅

Fig. 5 Annual variation with long-term water temperature trend in automatically recorded wells

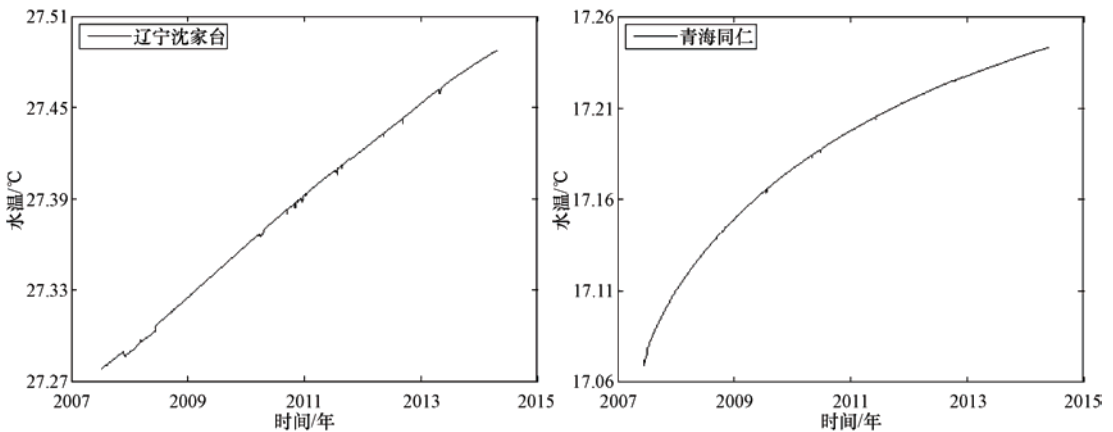


图 6 数字化观测水温中匀速型（左）和变速型（右）变化的典型曲线

Fig. 6 Typical curves of constant (left) and variable change (right) from automatically recorded water temperature data

数字化观测水温与人工观测水温相比，除观测系统不同以外，观测环境也不相同。数字化观测环境多为有一定深度的井水，目前数字化观测井多为水温变幅较小的非自流井，因而数字化观测环境的水温变幅较小。而人工观测环境多为出露地表的泉水和一些热水井，其水温变幅较大。

数字化观测水温与人工观测水温统计结果的不一致，可能与两者的观测系统和观测环境不同有关。对于人工观测水温，水银温度计基本能反映水温的变化情况，因而，人工观测的长期趋势性变化是水温的客观反映；而对于数字化观测水温，其长期趋势性变化的原因还需进一步分析。

3 数字化观测水温长期趋势性变化的原因分析

3.1 部分观测结果是水温变化的客观反映

在数字化水温长期趋势性变化的测点中，部分测点的长期趋势性变化是水温变化的客观反映。例如：安徽巢湖井，其井深 331m，观测段为 271—301m，温度传感器置深 195m。该井水温从 2007 年 9 月至 2014 年 6 月趋势性上升，水温与同井水位在短期、长期动态上有较好的相关性和同步性（图 7 左）。再如：云南下关井，其井深 315m，套管深 309m，滤水管段为 228—280m，温度传感器置深 300m。该井水温从 2001 年 8 月至 2006 年 6 月趋势性上升，2006 年 7 月至 2014 年 6 月趋势性下降，水温与同井水位在年动态、多年动态上有较好的相关性和同步性（图 7 右）。基于上述观测现象，笔者认为巢湖井和下关井的水温长期趋势性变化是同井水位变化引起的，因而，它们的长期趋势性变化是水温变化的客观反映。

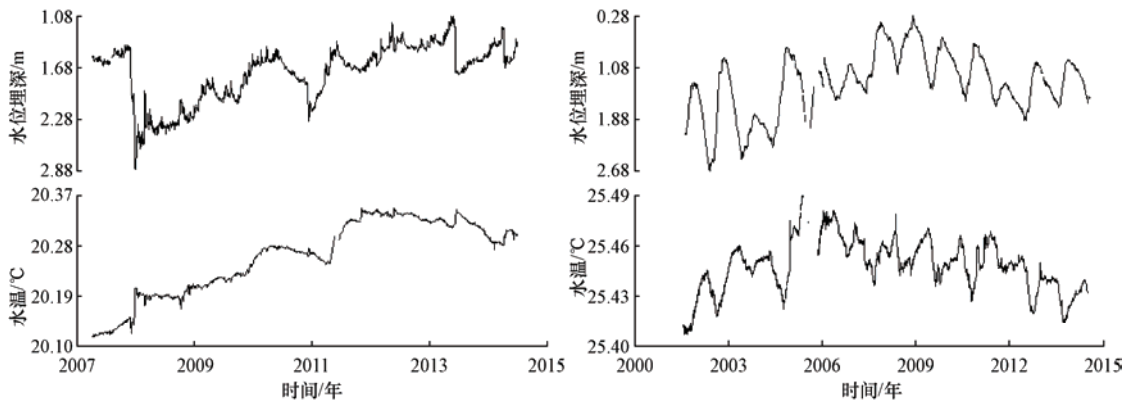


图 7 安徽巢湖井（左）和云南下关井（右）水位、水温变化曲线

Fig. 7 Plot of water level and temperature in Chaohu (left) and Xiaguan (right) well

3.2 部分观测结果是水温仪零飘的反映

在数字化观测水温长期趋势性变化的测点中，存在一些无法合理解释的现象。笔者对此现象分析后认为，部分数字化观测水温长期趋势性变化可能与水温仪的长期稳定性有关，即水温长期趋势性上升或下降是水温仪零飘引起的，而不是水温变化的真实反映。这些现象包括以下三方面。

(1) 不同井孔有相同的水温变化趋势。在 92 个水温长期趋势性变化的测点中，一些空间距离较远、温度传感器深度不同的测点有相近的水温年变幅（图 5）。笔者选取部分典型的

测点, 绘制了水温与起始值之差 (水温变化) 随时间的变化曲线, 如图 8 所示, 这些差异较大的测点有相同的水温变化趋势。从地热学的角度看, 不同观测环境存在相同水温变化的概率较小。在横向上, 不同区域的热状态不相同, 以能表征热状态的大地热流为例, 不同区域的大地热流的差异较大 (汪洋等, 2001)。在纵向上, 不同区域温度梯度不同, 即使距离较近的不同井孔, 温度梯度也有差异 (车用太等, 2011)。在时间上, 不同井孔受外界影响不同, 因而水温随时间的变化是不相同的。由于上述现象的存在, 我们可排除其它可能引起水温长期趋势性变化的原因。比如: 两个测点有相同水温梯度的概率较小, 可排除由于温度传感器固定不稳、电缆拉伸等原因引起的传感器下移, 进而引起的水温变化; 下降型水温趋势性变化的存在, 可排除由于仪器长时间工作发热所引起的升温变化。

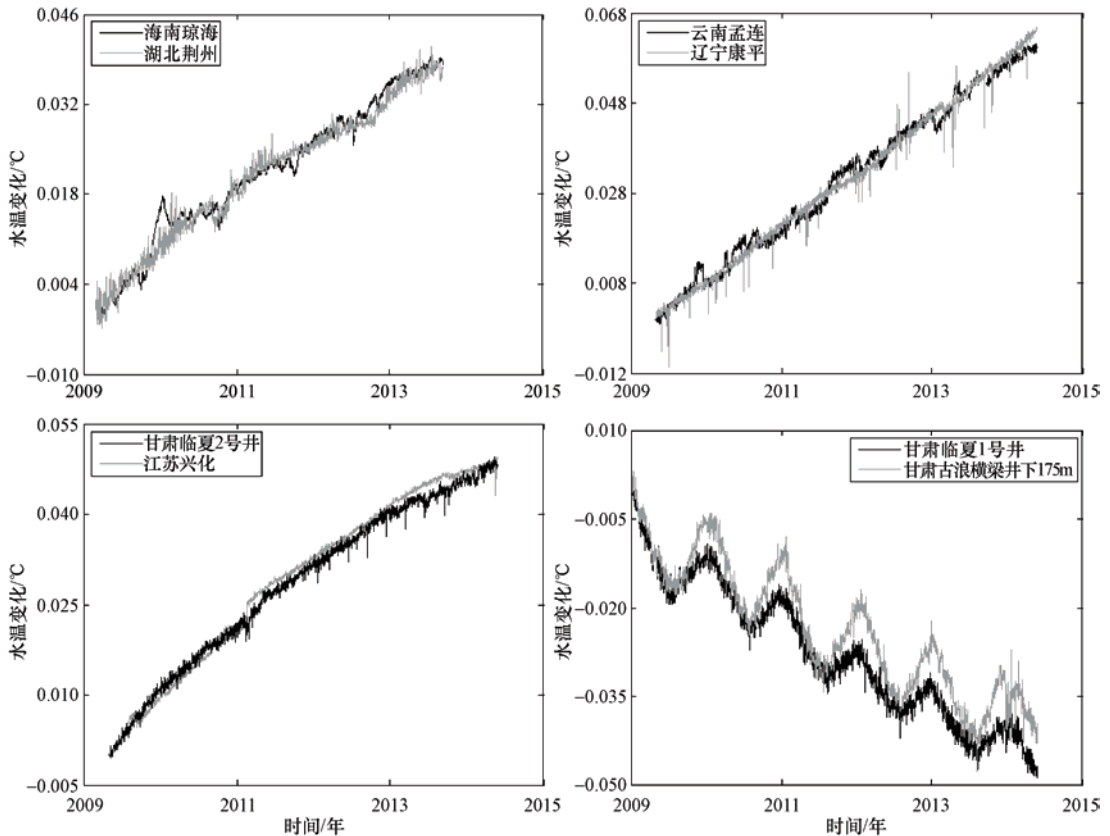


图 8 不同井孔的水温变化对比曲线

Fig. 8 Comparison of two wells with the same water temperature change

(2) 同井不同深度有不同的水温变化趋势。这种现象发生在部分同井不同深度有多个温度传感器的井孔内。例如: 甘肃古浪横梁井, 其井深 193m, 水泥固井至 71m, 在 55m、115m 和 175m 三个深度分别安装了温度传感器, 起始水温分别为 6.68℃、8.57℃和 10.02℃。多年的水温观测显示, 三个深度的水温动态有相似形态和幅度的年变特征, 然而, 三个深度的多年水温变化特征不同, 55m 和 115m 水温呈上升变化趋势, 而 175m 呈下降变化趋势 (图 9 左)。再如: 甘肃景泰芦阳井, 其井深 194m, 水泥固井至 150m, 在 60m、120m 和 180m 三个深度分别安

装了温度传感器，起始水温分别为 11.93°C 、 13.73°C 和 15.94°C 。多年的连续观测显示，上段 60m 和下段 180m 呈上升变化趋势，中段 120m 呈下降变化趋势（图 9 右）。对于存在热交换的井水而言，同井不同深度水温年动态一致、多年动态不一致的现象（图 9 左），以及同一井孔的上段和下段水体长期升温、中段水体长期降温的现象（图 9 右）均无法给予合理解释。

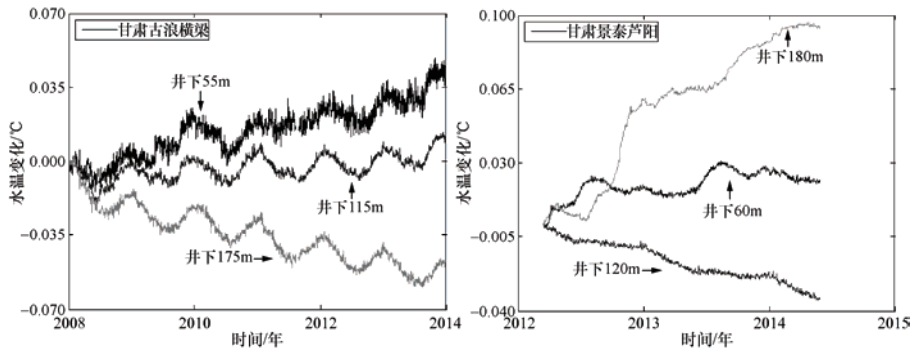


图 9 同井不同深度水温变化对比曲线

Fig. 9 Comparison of different water temperature changes in the same well

(3) 维修或校准水温仪后水温变化特征改变。基于台站的观测日志，笔者找到了几例在维修或校准水温仪后，水温变化特征发生改变的井孔，如图 10 所示。例如：辽宁汤池井、上海扬子中学井、江西上饶井、河南焦作井和云南澜沧井的水温仪，分别在 2012 年 7 月 16 日、2010 年 1 月 23 日、2009 年 7 月 30 日、2010 年 8 月 13 日和 2009 年 3 月 29 日出现故障。经维修恢复观测后，水温与起始观测值相当，在连续曲线上形成台阶。除云南澜沧井的水温变化速率无显著变化外，其它各井的变化速率均有改变。另外，浙江桐乡台于 2010 年 4 月 27 日对水温仪进行了校准，校准后水温小于起始观测值并形成台阶，水温变化速率增加。

4 结论和讨论

(1) 目前用于地震监测预报的泉主要分布在川滇、青藏高原东北缘、中天山、郯庐断裂带及邻区、北京西北和福建沿海等地，这些泉与断裂构造具有较好的空间相关性，其中，水温大于 25°C 的温泉多分布在中强地震多发区。

(2) 井下 50—149m 和 150—250m 的水温空间分布图显示，我国北方地区水温低于南方地区，小区域内的温差不显著，这些特征主要受控于气候因素；井下 150—250m 与 50—149m 水温相比，符合随深度增加水温升高的地热规律。

(3) 人工观测水温长期趋势性变化的统计结果显示，在 90 个测点中有 9 个为长期趋势性变化，占 10%，其观测仪器和方式表明它们的水温变化是客观的，证实存在水温长期趋势性变化的泉或井孔。

(4) 数字化观测水温长期趋势性变化的统计分析表明，在 380 个数字化观测水温点中有 92 个为长期趋势性变化，占 24%；数字化观测水温长期趋势性变化的原因，部分是水温的客观反映，另一部分是水温仪零飘的反映。

(5) 泉与断裂构造的空间分布存在相关性，温泉多分布在中强地震多发区，温泉水可能来自地下深部，而不是来自受气候因素主控的浅层地下水系统。因而，从地震监测

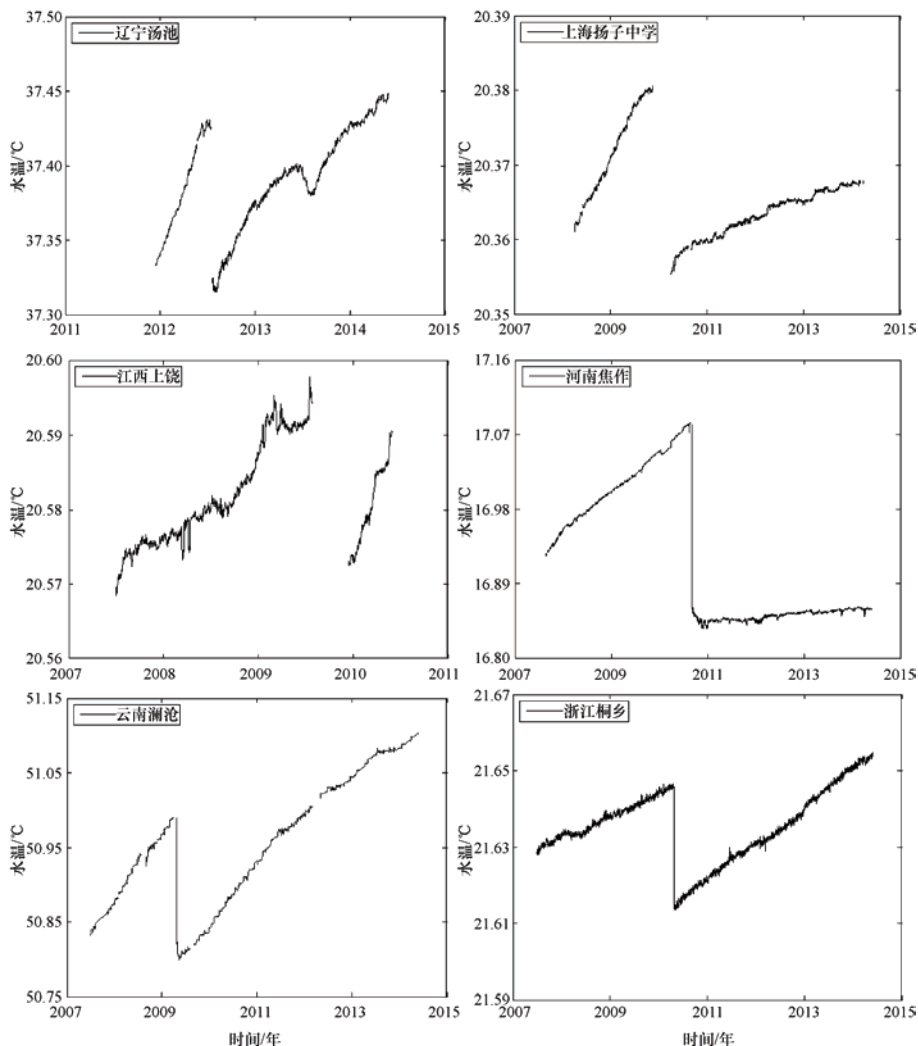


图 10 水温仪维修或校准前后的水温曲线

Fig. 10 Changes in water temperature after maintenance and calibration of thermometers

预报的角度看，应加强对泉、特别是温泉的物理化学特征监测，并发展适合泉特点的观测技术。

(6) 在使用数字化观测水温数据时，应注意水温仪零飘现象及其相关问题。例如：维修或校准水温仪后，水温速率变化引起的数据异常；用相同零飘特性的同型号水温仪进行对比观测时，水温变化特征可能是一致的，不利于水温趋势性变化特征的判别和分析。目前我国已建立的数字化观测水温井，其温度传感器置深较深，水温年变幅较小，有利于地球动力学信息的捕捉。然而，如果在这种观测条件下存在仪器零飘，将显著影响观测结果。因而，水温仪零飘的幅度、速率及改善方法，需要进一步研究。

致谢：本文在收集井孔基础资料时使用了全国各省、市和自治区的地震监测志，以及 2012 年、2013 年和 2014 年地下流体学科全国会商会的共享资料，在此向同仁们深表感谢。

参考文献

- 车用太, 何案华, 鱼金子等, 2011. 金沙江水网各观测井温度梯度的精细测量结果及其分析. 地震地质, **33** (3): 615—626.
- 车用太, 鱼金子, 2013. 井水温度观测中有待解决的若干基本问题. 中国地震, **29** (3): 306—315.
- 陈墨香, 1992. 新编中国温泉图及其说明. 地质科学, **27** (增刊): 322—332.
- 邓起东主编, 2007. 中国活动构造图 (1:4000000). 北京: 地震出版社.
- 邱永平, 2011. 宁波地震台 ZK03 井水温平行观测资料的对比分析. 中国地震, **27** (4): 431—437.
- 汪洋, 邓晋福, 汪集旻等, 2001. 中国大陆热流分布特征及热-构造分区. 中国科学院研究生院学报, **18** (1): 51—58.

Statistical Analysis of Long-Term Observation Data of Water Temperature in Springs and Wells

Ma Yuchuan, Huang Fuqiong, Xue Yan and Wang Bo

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract Based on the long-term water temperature data from groundwater monitoring network of China, we produced three distribution maps with spatial scope of mainland China. The first one is the water temperature in springs. The second one is the well water temperature in the depth range of 50-149m. The third one is the well water temperature in the depth range of 150-250m. Besides, we conducted statistical analysis on the numbers of stations which have long-term trend water temperature changes, for both of the manually and automatically observation systems. The main results are as follows. Springs are mainly distributed near the active faults. Hot springs (temperature higher than 24°C) are distributed in the regions where strong earthquakes had happened. The spatial distribution of well water temperature has relationship with regional climates, based on the phenomena that well water temperatures in the north are colder than the south and temperature differences are not big in small regions. After comparing well water temperatures at 50-149m with those at 150-250m, we found that temperature rises when depth increases. About 10% manually recorded water temperatures have long-term trend changes, which means that these changes are the reflection of the real water temperature changes. For the long-term trend water temperature changes in automatic observation system, some are the reflections of the real water temperature change, but some are caused by the zero drift of thermometer.

Key words: Spring well; Water temperature; Long-term changes; Earthquake; Zero drifts of thermometers