

# 面向气象学的计量学

## —— 欧洲MeteoMet计划简介

■ 张庆龄

计量学与气象学的英文对应词看上去非常相像，一个是“metrology”，一个是“meteorology”。欧洲正在进行的MeteoMet（面向气象学的计量学）计划所有项目的核心和亮点就是计量溯源性。而计量溯源性的两个核心要素就是校准（不间断的校准链）和不确定度（校准链的每项校准均会引入测量的不确定度）。

计量学与气象学的英文对应词看上去非常相像，一个是“metrology”，一个是“meteorology”。计量学是“测量及其应用的科学”。而测量（观测）则是气象学的基础。所以，计量学与气象学有着天然的联系。尽管如此，由计量学界主导的针对气象观测需要而开展的研究计划在世界范围内并不多见。所以，欧洲目前正在进行的MeteoMet计划非比寻常。MeteoMet意即“面向气象学的计量学”（Metrology for Meteorology）。本文将对MeteoMet计划做一简要介绍。

### 一、MeteoMet计划的背景

气候变化是当今社会、经济和科学发展中的一个热点问题。要对气候变化做出科学评估需要有高质量和可靠的气候观测资料。从计量学或测量学的角度看，气候观测资料质量的重要表征之一就是测量不确定度。而测量不确定度又与计量溯源性密切相连。测量不确定度只有在充分考虑计量溯源性的情况下才能够被确定，并被最大程度地减小。改进气候观测（测量）资料的计量溯源性，将对气候变化的分析产生显著影响。世界气象组织（WMO）和国际计量局（BIMP）都认识到，当今气候科学面临的许多挑战实际上是测量（观测）方面的。因此，国际气象界和计量界开展了非常有意义的合作。合作的核心就是改进气候资料的计量溯源性。

2010年4月，WMO正式签署了国际计量委员会国际互认协定（CIPM-MRA），成为第二个签署此协定的政府间国际组织。同时，WMO与BIMP在WMO总部，联合举办了名为“气候变化监测全球观测系统面临的测量挑战——溯源性、稳定性和不确定度”的研讨会。

2010年5月，国际计量委员会（CIMP）温度测量

咨询委员会（CCT）<sup>①</sup>召开了第25次会议，会上提出了“关于气候和气象观测测量”的建议，“鼓励各国国家计量院面向气候研究中有关计量溯源性、质量保证、测量校准方法等方面开展活动；支持各国国家计量院与气象机构之间的合作”。

在上述背景下，对于气候变化问题非常关注的欧洲计量界，于2011年在欧洲计量研究计划（EMRP）下，正式启动了“面向气象学的计量学”计划。该计划是欧洲计量界响应WMO-BIMP研讨会和CCT会议提出倡议的第一个正式的行动。

### 二、MeteoMet计划概要

MeteoMet计划是EMRP的一部分，并得到欧洲国家计量院联合会（EURAMET）的资助。参加此计划的包括受到资助的18个研究机构和3所大学，以及34个未予以资助的合作机构。该计划的执行期为3年，经费预算为4413683欧元，有6个工作组，30个子项目，计划交付65个成果，总共需要419人月的工作量。

#### 1. 主要方向

MeteoMet计划的主要研究方向是气候变化观测所涉及的计量溯源性，以及从计量学的角度对地面和高空大气的温度、气压、湿度、风向风速、太阳辐射观测和气象要素观测量之间的相互影响的研究。

#### 2. 科技目标

MeteoMet计划的科技目标基本上可以分为3部分，即新的计量方法，新的校准设施，以及对历时气候资料的计量学处理。具体包括5个方面：

气候观测的不确定度评估方法。研发对空气温度传感器进行精确校准的实验室设施和方法；研究建立

<sup>①</sup> 温度测量咨询委员会（CCT）是国际计量委员会下设的十个专业咨询委员会之一。

风速观测计量溯源性的方法。

改进湿度传感器及其校准方法。研制可溯源、可自校准、可调式吸收光谱法二极管激光器 (TDLAS)，研究水分子的吸收线；研究包括基于准球面腔体微波共鸣技术的湿度计、无接触式大气测量多传感器装置、超声风速计，以及新的基于GPS和伽利略导航卫星的测量方法；研究无线电探空仪观测的计量溯源性；获取用以改进水汽公式的新资料，提出新的用于水汽压力曲线方程式。

参考探空仪的校准装置。研发创新性校准系统，包括具有高度优化的热量和物质传导特性的测量箱，建立基于探空仪观测的计量溯源性。

自动气象站的校准装置。提出新的自动气象站校准方法和协议，评估太阳辐射和元器件老化对自动气象站的影响；研制可对温度、湿度和气压传感器进行同时校准的实验室和现场校准设施；研发对自动气象站软件进行确认的协议。

历史温度资料的计量学处理。评估用旧的技术（方法和仪器）获得的历史温度数据，估计当代数据与历史数据的一致性；研究和开发具有A类和B类不确定度<sup>①</sup>的不均一的历史观测资料的分析评估方法和软件。

### 3. MeteoMet计划的6个工作组

MeteoMet计划从管理和专业研究的需要出发，设立了6个工作组：

高空观测传感器和技术工作组。研究新的用于高空观测的湿度传感器，建立基于TDLAS的绝对湿度传感器的计量溯源链；研制可溯源至国家标准的可移动校准的标准湿度发生器和新的探空仪传感器校准箱；进行在接近真实高空条件和拥有国家标准环境下的传感器比对。

气候要素观测的新方法和新仪器工作组。研究用于低空和高空大气温度、湿度和气压观测的新方法和新仪器，以获取改进饱和和水汽方程准确性的新数据。该方程适用的温度范围是-80~100℃，目标不确定度<sup>②</sup>为0.85%~0.04%。

地面气象观测测量方法和协议工作组。针对气候研究和气象学长期、大尺度观测的需要，研究地面温度、湿度、气压和风速观测的可溯源的观测方法和协议，研究超声风速计观测资料的不确定度评估和现场校准方法。

观测资料协调化工作组。主要进行历史温度观测资料评估和数据融合的工作。研究历史温度观测资料不

确定度的来源，并将这种来源的不确定纳入总的不确定计算报告中，修正气候模式的输入数据。通过这种工作，强化对气候变化的识别、预测和适应性评估。

除上述4个专业研究工作组外，MeteoMet计划还设立了“推广和传播”和“管理与协调”两个工作组。

### 4. MeteoMet计划的预期结果和影响

通过MeteoMet计划的实施，可以推动计量学和气象学研究的发展。预期成果包括：获得一个经过确认的用于欧洲气候指示因子的基本参数规定；获得可靠的测量协议和可溯源的传感器校准规程；推动气象机构所属自动气象站的校准直接溯源至国家标准，使得观测资料更准确并附有不确定度报告；提高对大尺度和长期温度观测资料的标准化和保证计量溯源性的方法的需求。

MeteoMet计划的实施，可以促进气候观测资料可靠性的提高和对历史数据的正确解读，降低气候影响模式的不确定度，从而提高长期和短期气候变化预测结果的可靠性。而更可靠的气候变化影响模式可以为制定有效的国际和国家应对气候变化的政策提供更好的指导和依据。

### 三、MeteoMet计划研究示例

MeteoMet计划所有项目的核心和亮点就是计量溯源性。而计量溯源性的两个核心要素就是校准（不间断的校准链）和不确定度（校准链的每项校准均会引入测量的不确定度）。为满足气候观测的需要，获取高质量的气候资料，进行真正符合计量学意义的校准和不确定度分析具有重要的现实意义。例如，由于不具备符合校准条件的设施，对探空仪就不能实现业务化的实验室校准。对大量布设的自动气象站也不能进行严格现场校准。再例如，气候观测业务采用新的观测方法需要研究解决校准问题。现行的业务化的校准方法也需要改善和优化。例如，目前对于温度观测仪器的校准通常是在液体槽中进行的。而实际上，气温是在空气中观测的。由于空气和液体的性质不同，它们对气温观测所引入的不确定度的贡献也是不同的。这种不同对于气候观测资料的质量也是有影响的。此外，对历史气候资料的计量学处理，主要面临的问题也是计量溯源性和不确定度。MeteoMet计划正是围绕这些实际问题开展了有非常有意义的工作。以下列举几个与我国有关工作可进行对照的MeteoMet计划的研究示例，以帮助对该计划有一个感性的了解。

① A类和B类不确定度：用统计方法进行测量不确定度分量评估得出的测量不确定度分量为A类不确定度；用不同于A类评估方法得出的测量不确定度分量为B类不确定度。

② 目标不确定度：根据测量结果的预期用途，规定作为上限的测量不确定度。

## 1. 研制探空仪湿度传感器快速校准系统

该项目主要针对的是对参考级探空仪进行实验室校准问题。

提高探空仪湿度观测的质量是WMO世界气候观测网参考探空网（GRUAN）的重点。要达到GRUAN要求的精度目标，获得可靠的气候观测资料，一个关键的因素就是通过科学的校准使探空资料具有良好计量溯源性。但是，目前对探空仪的实验室校准是非常困难的。由于在模拟高对流层和低平流层的实验室环境条件下进行湿度校准非常耗时，因而，对探空仪进行实验室校准在目前是难以实现的。为此，MeteoMet计划研发对探空仪湿度和温度传感器的校准方法，创建一个用于建立探空仪观测计量溯源性的参考装置。

该项目主要由芬兰计量认证中心承担，具体研发内容包括：应用热量和物质传导研究成果，结合相关的试验，设计和建造一个高效的测量箱。这种测量箱可以缩短包括在低温范围的校准时间，使一套探空仪的校准可以在一天之内完成；研发一种基于饱和器的低至 $-90^{\circ}\text{C}$ 的霜点温度参考标准；研制对测量箱的空气温度和霜点温度进行准确和有效控制的装置；对整个测量箱进行测试，并进行全面的不确定度分析。

## 2. 研究在空气中进行温度传感器校准的设施和方法

该项目主要针对的问题是降低温度观测的不确定度。

对全球气候变化的估计，需要的温度观测资料的不确定度要小于 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。降低温度观测资料的不确定度，需要考虑源自传感器校准方法本身的不确定度。目前，对温度传感器的校准是在液体槽中进行的。而液体与空气的热力环境是完全不同的，由此产生的额外的不确定度经常被忽略。

该项目的研究目标是将空气温度传感器校准的不确定度，在 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内，从 $0.08^{\circ}\text{C}$ 降低到低于 $0.05^{\circ}\text{C}$ 。这项研究有助于增加对气象温度观测的误差来源和现实不确定度的认识。这将提高温度观测（特别是空基观测）的准确度。

该项目由英国国家物理实验室负责，具体研发内容是：研制一个准确的空气温度校准设施。该设施将对气流进行控制，并可随校准环境的变化对热交换进行调整。同时，对仪器和其他热源产生的误差和不确定进行研究分析。最终，在 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的温度调整范围内，使在空气中进行的温度校准的不确定度小于 $0.05^{\circ}\text{C}$ 。同时，提出如何将温度调整范围延展的建议。

## 3. 研制可同时对气象站温度、湿度、气压传感器进行组合校准的实验室校准设施

该项目针对的是气象观测要素之间相互影响的问题。

目前对自动气象站的校准缺乏对各要素之间的相互影响的考虑。由于传感器的校准不是在类似于野外环境的条件下进行的，所以，常规的校准可能引入系统误差。目前，在欧洲没有专用的可以同时产生和控制温度、湿度、压力、风速和太阳辐射的环境校准箱。这种能同时模拟地球表面条件的校准装置，可以更好地对气象站观测资料的不确定度进行评价，使其具有更可靠的计量溯源性。

MeteoMet计划将研制以上所述需求的校准装置。拥有了这种装置将对温度、湿度、气压单独的校准曲线之间量值的相互干扰，以及太阳辐射和风速对其他观测要素的影响进行研究。这项工作将提出自动气象站温度、湿度、气压传感器校准的新协议和流程，同时还对实验室校准与现场校准的关系进行分析。

该项目由多个欧洲科研和计量单位完成，具体研发内容包括：

由波兰低温和结构研究院等在实验室条件下，用自动气象站使用的温度（ $-50\sim 50^{\circ}\text{C}$ ）、湿度（ $10\%\text{Rh}\sim 98\%\text{Rh}$ ）和气压（ $800\sim 1100\text{hPa}$ ）传感器进行测量。用测量结果与华沙大学的自动气象站的日常观测结果进行比对分析。这种比对分析结果可为制定自动气象站校准规范提供基础。

由芬兰计量认证中心利用其压力-温度-湿度校准设施，对前述3种气象要素之间，在 $-50\sim -20^{\circ}\text{C}$ 的低温范围内相关性进行研究。在此基础上设计出一种考虑到3个要素之间相关性的优化校准规程。

由意大利国家计量院建造一个新的自动气象站参考设施，以满足用户对计量溯源性的要求。该装置为圆柱体，直径约 $1.3\text{m}$ ，长度为 $1\text{m}$ 。该校准装置的内部结构适合安装各种自动气象站和气象观测用传感器。温度、压力和湿度可分别单独控制，可同时实现：温度控制偏差小于 $0.05^{\circ}\text{C}$ ，温度调整范围为 $-40\sim 50^{\circ}\text{C}$ ；压力控制偏差小于 $0.1\text{hPa}$ ，压力调整范围为 $750\sim 1100\text{hPa}$ ；在温度为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 条件下，湿度范围为 $5\%\sim 98\%$ ，准确度为 $0.3\%\sim 0.7\%$ 。该装置还可产生最大 $30\text{ m/s}$ 的风速，并具有太阳辐射发生器，用以评估风速和太阳辐射对温度、压力和湿度传感器的影响。

## 4. 研制可溯源的自动气象站现场校准装置

该项目主要是针对自动气象站的现场校准问题。

现行的自动气象站现场校准存在许多计量学方面的弱点。首先，由于用于比对的标准器不能长期在露天状态下工作，所以校准不能覆盖传感器的整个量程，因此不能完整地确定传感器的直线性和不确定

度。同时，也无法对观测要素之间的相互影响进行评估。此外，对在高海拔和极地地区安置的自动气象站需要有明确的校准规定，以保证这些自动气象站能溯源至国家标准。

MeteoMet计划研制一种用于自动气象站现场校准的，可安放在中型汽车上的小尺寸可搬运的气候箱。通过这项工作，可以提出保证布设在遥远和高海拔地区的自动气象站的计量溯源性的方法和规程。这种可以同时产生温度、湿度和压力值的气候箱，将建在珠穆朗玛峰脚下，位于尼泊尔境内海拔5050m处的金字塔观测站。通过这种装置和专用的规程，促进高海拔地区气候监测的进步。

该项目由意大利国家计量院负责，具体研发内容包括：研究和建造一个缩小尺寸的设施，用于自动气象站的现场校准。这种装置可对温度、湿度和压力传感器进行同时校准，测量范围覆盖自动气象站可能遇到的环境条件。其温度控制偏差小于 $0.05^{\circ}\text{C}$ ，温度调整范围为 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ ；气压控制偏差小于 $0.1\text{hPa}$ ，气压调整范围为 $500\sim 1100\text{hPa}$ ；湿度调整范围为 $5\%\sim 95\%$ ，不确定度为 $1.5\%$ 。该装置产生的温度、湿度和气压的值的仪器测量是直接测量基准进行校准的。

#### 5. 开发考虑计量溯源性的用于历史和未来温度资料协调处理的计算模式

该项目主要针对的是历史气候资料的不均一问题。

为了改进历史资料序列，需要对不同时期由于采用新的协议对气候资料的影响进行最优估计；同时，还要在模式中考虑不同地区的人类活动。为了获得气候评估所需的时间序列资料的修正值，必须要用最新的统计技术或新的程序进行统计均一性试验和时间序列均一化处理。

MeteoMet计划研制一套数学软件模式，用来从计量学测量和不确定度的角度，对时间序列历史资料进行模式化处理。

该项目由多个欧洲计量单位负责，具体研发内容包括：

由捷克计量院和斯洛伐克计量院负责开发克服历史观测资料地点和时间的不均一性的方法。该方法基于对历史资料的认识和MeteoMet计划其他相关部分研究结果的数学软件模式。该方法可以根据国际温标的演变，重新计算温度值，并包含B类不确定估计；依据对测量方法、观测仪器等方面现有的知识，按照历史资料的质量，对部分或整个资料集进行加权处理。将A类不确定度和B类不确定度包含在对温度趋势的评估中。

由挪威计量局负责对该模式进行测试，对取得的

进步和遇到的问题进行评估。

#### 四、结束语

本文对欧洲MeteoMet计划进行了简要介绍。MeteoMet计划并不是一个非常庞大的计划，但它从保证气候观测资料计量溯源性的角度，在新仪器研制、校准方法、历史数据评估、观测资料质量保证等方面开展了非常有意义的创新性工作，为计量学与气象学的相互促进，特别是将计量学的关键理念、技术和方法，具体应用到相关的气象科技工作，提供了一个鲜活的实例。该计划从两方面给我们以启发。首先，MeteoMet计划显示出计量工作可以在气象科技工作中发挥更大的作用。目前，我国已形成相对完整的气象计量工作体系。但是，气象计量机构开展的工作主要是对气象观测仪器进行法定的计量检定工作。当今国际计量学已经有了长足的发展，气象界也对计量学有了新的需求。欧洲MeteoMet计划，为气象计量工作者提供了一个通过应用计量学的理论、方法和技术，促进气象科技工作发展的范例；同时，MeteoMet计划为有关气象科技工作，特别是气候资料处理等方面的工作，展示了一个可能的新途径。目前，我国气候资料分析中采用的一些统计分析方法与计量学所采用评估A类不确定的方法相类似，也有用到不确定度概念。但是，真正用到符合计量学意义的如计量溯源性、测量不确定度等的概念、技术和方法的工作不多。通过对MeteoMet计划的了解，可以发现在气候资料分析等工作中，科学地采用计量学的一些技术和方法，可能是提高工作质量和水平的一个有益途径。

(作者单位：中国气象局综合观测司)

#### 深入阅读

García Izquierdo C, Bertiglia F, Benyon R, et al. 2012. Traceability of Ground-Based Meteorological Surface Temperature Measurements. WMO TECO-2012.

Guidance on instrumentation for Calibration Laboratories. 2010. WMO/TD-No. 1543.

Knutti R, Sedláček J. 2012. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nat Clim Change, 3: 369–373.

Merlone A, Lopardo G, Antonsen I, et al. 2013. A new challenge for meteorological measurements: The "MeteoMet" project - Metrology for meteorology. AIP Conf Proc 1552, 1030.

Report on the WMO-BIPM workshop on Measurement Challenges for Global Observation Systems for Climate Change Monitoring: Traceability, Stability and Uncertainty. 2010. IOM-Report No. 105 (WMO/TD-No. 1557).

李庆祥. 2011. 气候资料均一性研究导论. 北京: 气象出版社.