

# 美国气候基准站网建设及启示

任国玉<sup>1, 2</sup> 初子莹<sup>3</sup>

(1 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081;

2 中国地质大学环境学院大气科学系, 武汉 430074; 3 北京市气象局, 北京 100089)

**摘要:** 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 已基本建设完成了一个全新的国家气候基准站网 (USCRN)。USCRN旨在为美国提供一个新的基准气候观测网络平台, 降低长期地表气温与降水序列中不可解释的变化, 更好地监测国家气候并支持气候变化影响研究。该观测网当前所包含的站点为137个 (最终达到145个), 其中美国本土地区114个, 阿拉斯加21个 (最终将达到29个), 夏威夷群岛2个, 站点气候观测信息包括气温、降水、地面风速、土壤条件等。所有站点位置选择标准都极为严格, 并保证未来观测环境长期不会改变, 站点基本要素观测资料将不需要再进行任何非均一性处理和城市化影响偏差评估与订正。USCRN为全球气候观测系统建设树立了一个标杆, 值得包括中国在内的所有国家在规划和设计本国气候观测系统时借鉴。

**关键词:** 美国, 气候基准站, 气候观测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.04.009

## A Brief Introduction to the U.S. Climate Reference Network

Ren Guoyu<sup>1,2</sup>, Chu Ziyang<sup>3</sup>

(1 Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074

3 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089)

**Abstract:** The U.S. climate reference network (USCRN) is a systematic and sustained network of climate monitoring stations with sites across the conterminous U.S., Alaska, and Hawaii. It is managed and maintained by the National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA). The vision of this program is to provide a continuous series of climate observations with the minimum unexplained diversification for monitoring trends in the nation's climate and supporting climate-impact research. Currently, there are 137 sites in the network, including 114 sites within the continental U.S., 21 sites in Alaska, and 2 sites in Hawaii. These stations use high-quality instruments to measure temperature, precipitation, wind speed, soil conditions, and so on. To avoid further homogeneity or urban impact test and calibration, strict criteria are applied for site selection to ensure the pristine quality of observatory environments in the future. Base on USCRN, NOAA began to deploy U.S. regional climate reference network (USRCRN) across the 9 NOAA climate regions with the same criteria since 2009 to monitor regional climate variation signal. In general, the USCRN could be taken as a benchmark for national climate observational system construction.

**Key words:** U.S., climate reference network, climate observation

### 0 引言

美国具有悠久的气象观测历史。自从19世纪初以来, 美国就开展气温、水汽、气压、降水和风速、风向观测, 获取实时天气信息, 并建立了历史天气资料数据库。但是, 和世界其他地区的气象观测一样, 美国的气象观测长期以来主要为天气预报服务, 几乎没有考虑后来气候变化研究和监测的需要, 所获得的历史天气观测资料数据存在着较严重的因迁站和更换仪器等造成的非均一性误差, 以及较大的由于城市化过

程引起的系统性偏差<sup>[1]</sup>。尽管对这些历史天气观测资料进行了严格的检查和均一化处理, 资料非均一性问题和城市化影响偏差问题仍然是当前气候变化观测研究不确定性的主要来源。

为了获取连续的、不受局地人类活动干预的高分辨率长期地面气候观测记录, 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 规划建设了美国国家气候基准站网 (USCRN)<sup>[2-3]</sup>。结合过去长期的历史观测记录, 这套记录可以为当前的气候变化检测、归因以及未来气候变化预估奠定坚实的观测基础<sup>[2-3]</sup>。美国本土的114个国家气候基准站于2008年建设完成; 除本土站外, 截止到2017年底的国家气候基准站还包括夏威夷群岛的2个站点和阿拉斯加的21个 (最终将达到

收稿日期: 2017年11月28日; 修回日期: 2018年12月6日

第一作者: 任国玉 (1958—), Email: guoyoo@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金 (41575003)

29个) 站点。至此, USCRN已基本实现业务化, 由NOAA国家环境信息中心(NEIC, 即原来的国家气候资料中心NCDC)管理运行, NOAA大气湍流和扩散部(ATDD)合作运营。作为USCRN的补充, NOAA自2009年起开始着手建设区域气候基准站网(USRCRN)。区域气候基准站只观测气温和降水, 但在空间上更为密集, 并且延续了与国家气候基准站同样高的建设标准。其长期目标是在全美9个气候区建设观测站网, 其空间分辨率大致为130 km, 用于检测区域气候变化信号。USRCRN建成后, 全美的国家和区域基准气候站数量将达到538个。

## 1 目的和意义

长久以来, 美国科学界的许多人士都认为, 美国拥有世界上最完备的地面气候观测网, 领先于世界大多数国家。但NOAA的管理者和研究人员也意识到, 美国并没有一个能够避免随机和系统偏差的地面观测网, 事实上即使很小的系统偏差, 也足以影响对于年代以上尺度气候变化与变异特征的解释, 并造成气候变化监测和检测结果的不确定性。美国国家研究委员会(NRC)于1999年对美国气候观测站网评估后得出结论: 美国需要稳定现有的观测能力, 并识别那些尚未被充分观测的关键气候变量, 同时, 特别指出要针对气候变化研究和具体业务需求, 制定并执行国家观测计划<sup>[4]</sup>。这份报告强调, 美国需要一套新的观测系统, 这套系统能够真正有效地增进人类对于自然和人为气候变化的理解, 而且不仅可以服务于当代的气候学家, 还能够服务于未来从事相关研究的科学家们。

NOAA当局意识到, 气候科学正处在一个十字路口。一方面, 研究者已经做出大量卓越的工作, 证实了区域、全国和全球尺度气候变化; 另一方面, 现有观测系统提供的数据质量先天不足, 气候观测业务存在着严重危机。建设国家基准气候观测网是NOAA对这一危机和NRC建议<sup>[4]</sup>的积极响应。USCRN资料将用于未来的气候变化监测业务和科学研究, 也将为全球气候观测系统(GCOS)建设做出示范。人们希望, USCRN运行50年后, 可以回答这样的问题: 在过去50年间, 美国区域气候究竟发生了怎样的变化?

USCRN计划在美国历史上没有先例, 在观测站网与系统设计、候选站点征用许可与评估、设备安装和维护、观测及资料评估、应用等多个环节, 都需要联邦政府层面的有效协调。为了在最大程度上削减建设和运行成本, 增进计划完成后的科学和社会效益, USCRN建设也对美国政府部门间协调合作提出了重要挑战。到目前为止, 尽管各个部门之间的协调、合作

也出现过问题, 但总体来说是成功的。

在NOAA内部, NEIC和空气资源实验室(ARL)进行了有效合作。在USCRN的工程设计、站点布设、站点维护和仪器标定等方面, ARL的研究人员均给予大力配合, 发挥了重要作用。此外, ARL还对未来新仪器的可应用性提供及时分析评估。

## 2 站址遴选和站网布局

为了得到符合严格建设标准的观测网, USCRN和USRCRN计划完全遵循Karl等<sup>[1]</sup>提出的气候变化监测基本原则。USCRN的站址确定, 在一定程度上也考虑了全球气候观测系统表面网(GCOS/GSN)制定的原则和标准, 但总体上二者差异十分突出, 因为GCOS/GSN的原则和标准是在兼顾现有观测网和长序列历史观测记录条件下提出的<sup>[5-6]</sup>, 距离满足气候变化监测和研究需求尚远远不够。

按照最初制定的计划, USCRN和USRCRN建设必须满足严格的标准。例如, 所有站都要建在目前和未来都不会受到明显人为干预的自然环境中(图1); 要能够抵御飓风、严重结冰和雪暴、高于120 °F (49 °C) 或低于-50 °F (-46 °C) 的温度等极端天气, 在任何

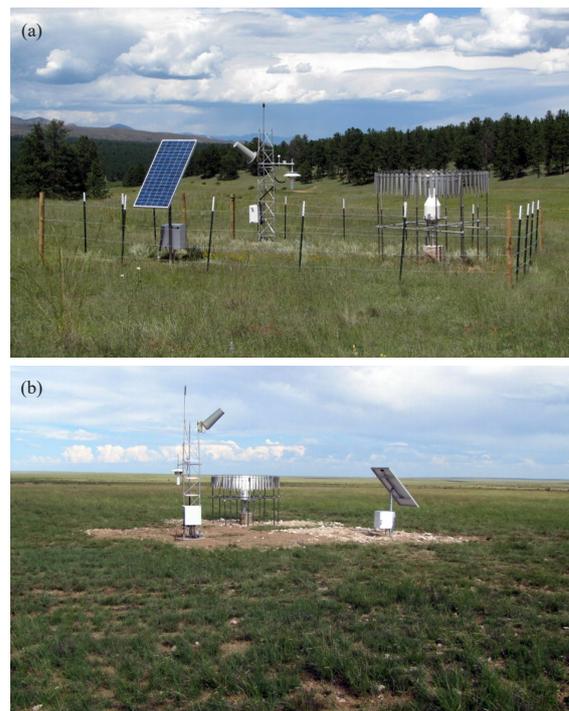


图1 USCRN站点观测环境 (USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/>)

(a) 科罗拉多州Springs站 (39.1°N, 105.09°W, 2010年6月30日); (b) 新墨西哥州Vaughn站 (34.1°N, 104.93°W, 2010年8月28日)

Fig.1 Observational environment of the USCRN Stations (from USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/>) Springs Station; (b) Vaughn Station

天气条件下保持气候观测不中断；备份电池和太阳能发电装置要确保仪器电力意外中断时继续采集数据。

选取站点时，首先考虑大尺度的台站宏观地理位置。具体遴选标准包括：

#### 1) 区域和空间代表性

考虑大尺度地形影响，站点要能够捕捉到区域性主要气候变异模态。研究表明，美国50个州大约225个均匀分布的站点可以在全国尺度上基本捕获每年气候变异和趋势<sup>[7-8]</sup>，但最终设置多少站还取决于财政预算。

#### 2) 区域气候变异和变化趋势敏感性

站点位置应该对区域性气候变异和变化趋势具有代表性，不受局地地貌特征或中小尺度自然和人为因素影响。

#### 3) 站址的长期稳定性

重点考虑所选站址周围区域是否会在未来50~100年发生重大变化。需要评估备选站址被人为干预区域包围的风险，以及台站由于土地开发或其他原因被迫关闭或迁址的可能性。

#### 4) 较低的自然灾害风险

避免在自然灾害风险很高的地方建站，如易发生洪水的低地、强风风口、深厚积雪点、浓雾弥漫

区等。

#### 5) 靠近已有观测网站址

备选台站位置应尽可能靠近现在或过去具有长序列观测资料的站点，以便核准和比较新旧观测资料。

#### 6) 交通和电力便利性

设备安装和定期维护等要求站址所在区域常年可以通车、最好靠近电源，但偏远地区也可采用太阳能电池。

在上述原则和标准中，空间代表性和时间稳定性是最为重要的，在确定具体站点位置时给予了优先考虑。

站点具体位置的确定原则和方法也很重要。在这方面，USCRN发展了一套局地代表性评估方法。标准观测场面积为18 m×18 m，站点周边环境必须相对宽敞、平坦、干爽，植被密度低且远离水体。具体站址的选择还要考虑其他因素，综合决定。USCRN采用分类方案<sup>[9]</sup>对每个地点的气象观测代表性打分，确定具体站址位置。

观测场内仪器设备安装布局如图2所示。其中雨量计周围的防风障可以有效降低近地面风速，提高液态和固态降水测量精度。观测场周边可以树立链式或牛栏式围栏，一般限定在4~5英尺高（1英尺=0.3048 m）。

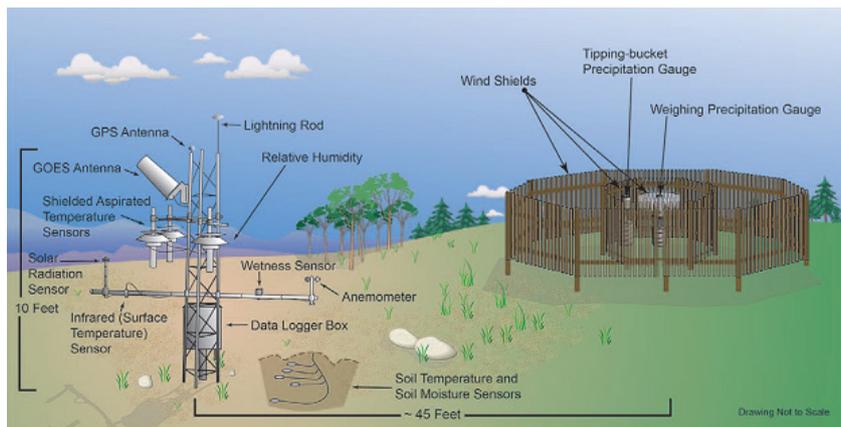


图2 美国USCRN 典型观测场布局 ( USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/> )

Fig. 2 Typical layout of the instruments at a USCRN Station (from USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/>)

截止到2017年底，USCRN已经建成了137个站组成的网络，其中包括单独站点100个，双场（一个地点两个站）站点14个，阿拉斯加21个，夏威夷2个。USCRN站网正在建设。图3给出了截止到2015年底各类USCRN站的分布情况。

### 3 台站观测设备

USCRN自动观测系统以深循环电池为动力，仅需偶尔维护，可实现偏远地区无人情况下的持续操作。系统操作环境非常宽泛，温度为-60~60℃，风

速在50 m/s以下，雨量不大于30 mm/min，但降水观测系统正常工作环境在-25~60℃。

USCRN自动观测系统是一套通用的观测系统，以气温、降水、太阳辐射和风速等为核心观测要素，并可根据需求随时扩展安装新的附加型传感器，用于观测其他气象要素。后来USCRN站还同时配有观测相对湿度、土壤水分和土壤温度的传感器。此外，在观测气象要素的同时，系统也同步监测电池电压、吸出气风扇工作参数等自检变量，用以迅速诊断出现的问

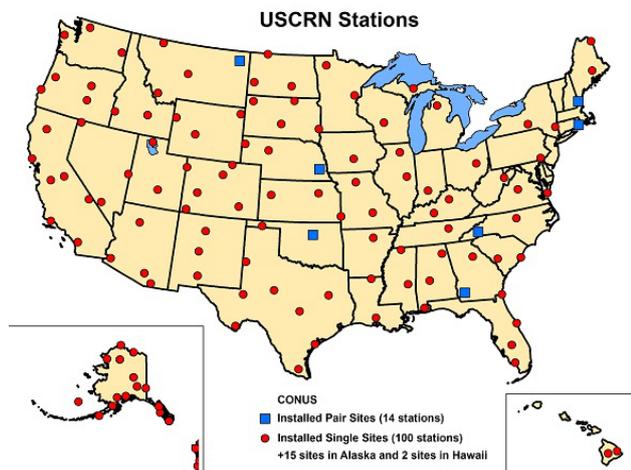


图3 美国USCRN站2015年底分布情况 (USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/>)

Fig. 3 Distribution of the USCRN Stations as of 2015 (From USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/>)

题, 帮助系统尽快得到修复。为降低系统误差、校订漂移和能量损耗, 系统选择不需要外部转换器的仪器设备, 可以通过最小的调整来满足USCRN对误差、精度与可信度的要求。

自动观测系统中, 除降水观测系统外, 所有仪器均安置在一个管壁厚重的铝质观测塔架上。塔高3 m, 底部可用于安装重型观测仪器, 塔架本身嵌入厚重且坚实的混凝土基座中。参照WMO推荐的气候观测标准, 气温和其他支撑传感器均位于1.5 m高处, 包括转杯式风速计 (Met-One 014A型), 测量总入射太阳辐射的日照强度计 (KIPP/ZONEN SP Lite silicon), 以及测定地表温度的高精度红外热电偶传感器 (IRTS-P IR)。降水观测系统及其防护罩安装在距观测塔15 m的地方。观测站中所有线路均设置在埋藏的管道中, 以降低动物对线路造成的损坏。在一些站点, 一系列具有连锁反应的防御设施被安装在观测塔周围, 用以防范不速之客的入侵。安装仪器所使用的硬件设施均为不锈钢或铝制品, 以防腐蝕。

由于近地面气温和降水是关键气候要素, USCRN为其设计了严格的三重备份传感器。这个设计是独特的, 主要目的是保证当有一个或两个传感器出现故障时, 另外至少有一个传感器仍能工作, 以便保证任何一个站点观测记录具有完整性、连续性和准确性。

例如, 温度传感器包括3个完全独立的铂电阻温度计, 每个温度计都有独立的风扇排气式防太阳辐射罩 (温度计型号为: Met-One 076B; 风扇型号为: PABST 4212/12H 12VDC, 外部接有转速计, 且转速计接电部分为包金设置, 以加强其耐腐蚀性)。三个

温度计完全独立测量, 正常情况下, 这些温度计的读数应非常接近, 这也使得传感器的错误可以非常容易被检测出来。

测量降水的仪器为GEONOR T-200B 称重式雨量计, 测量由3个独立的振动电线负载传感器来实现。这些负载传感器均加了附加设施, 用以防止因某个传感器电线破损而造成其余传感器的超负荷运转。雨量计本身附加了智能集电加热器和电热调节器, 当集电器处于 $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 仪器开始自动加热。此外, 作为备用设施, 很多站点还安装了Eco-Harmony TB-3翻斗式雨量计。所有雨量计周围设置可变形不锈钢“摆叶”防风障, 外围设置小型双壁防风屏, 以保证在有风状况下, 雨量计对实际降水量的测量精度 (图4)。为防止大风引起的仪器振动, 雨量计被安装在铝制管道混凝土基架上。



图4 装有防风罩的称重式雨量计 (图中白色物体为雨量计) (USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/>)

Fig. 4 Rain gauge with windshields at a USCRN Station (From USA/NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/>)

采集到的观测数据通过坎贝尔数据采集系统记录并传输。数据记录保存在制造商提供的附加内存中, 系统保存这些数据用以应对长期断电等风险。SEIMAC-HDRGOES无线电传输器通过引向反射天线来实现与GOES卫星的通信。数据记录器和传输器装在由玻璃纤维强化塑料制成的密闭容器内, 容器表面涂成白色, 并装有门闩, 避免因任何原因导致的门开启时引起的仪器暴露, 同时配有一小型加热器, 用以保证数据记录器与传输器内部温度不低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

系统电力由2~4节铅酸深循环蓄电池提供, 所需电池的具体数量由当地气候 (特别是加热需求) 决定, 即使充电失败, 仍然可以保持5~6天的正常工作。多数站点采用交流电, 利用充电器为电池充电,

并通过一条极端振荡保护带来防止交流电路中出现尖峰信号；部分站点采用太阳能，利用2~4块太阳能电池板和一个校准器为电池充电。电池与充电器（或校准器）装在表面涂成白色的独立密闭容器中。

USCRN自动观测站的所有传感设备，安装前均按照美国国家标准技术研究所（NIST）可追踪标准进行校订。

#### 4 数据传输及处理方法

USCRN采用卫星传输方式，每隔1 h，以最小95%的通信效率向NOAA的NEIC提交所有数据。观测数据首先通过NOAA GOES卫星数据搜集系统（DOC）传递到弗吉尼亚州的瓦勒普斯岛，随后再通过英特网与DOMSAT商业卫星系统发送到位于北卡罗莱纳州的NEIC。如果个别站点信息传送失败，将在卫星通信恢复后自动尝试再次传输；如果仍未成功，将联系工作人员，请求人工获取数据并通过互联网或是硬盘拷贝的方式将资料传送到NEIC。观测数据通常在USCRN系统内存保留5个月，工作人员访问站点时可利用笔记本电脑或掌上电脑提取，人工手动提取的数据必须在观测月结束后30天内，以最小97%的成功率向NEIC提交。

USCRN站点各要素的自动观测设备每2 s读数1次，每5 min自动计算一次所有2 s读数的平均值，每1 h自动计算一次12个5 min平均值，数据均回传至美国国家气候资料中心存档。对于设有三套独立的感应器温度和降水观测，数据回传后，工作人员将根据设备运行状况评估结果，对5 min间隔的观测数据进行处理，选取同一时段三套观测数值的中值或是平均值作为该站气温或降水观测的最终数值。

采用3套传感器的方式明显提高了数据观测的连续性和数据质量，但由于需要在每5 min传输的数据中选取一个最佳数据，整体计算过程相对复杂。此外，对于降水观测而言，这样过于强调误差控制的方法也会导致降水量观测数据偏低等问题。为此，NOAA新近研究了一套新的降水数据处理办法，通过加权平均，提取三套独立观测数据中共同的降水量观测信号。采用新方法后，USCRN全网降水增加约1.6%，新方法对弱降水和降水开始阶段的观测数据改进非常明显。2015年8月，USCRN正式使用这套更接近实际降水量的数据处理方法。此外，2004—2005年开始5 min间隔观测后的所有历史数据都已采用这套方法重新处理。

所有USCRN的观测数据和元数据均可在NEIC网站上获取。元数据包括站点照片和全景、按序号排列

的仪器清单、所有仪器的安装时间与变换时间、传感器校准历史、站点设置和维护历史、校订、安置与维护的过程、异常跟踪以及其他细节。从系统整体到单个传感器，都有完整的元数据记录，这为数据使用者增添了更多信心。

USCRN气候数据集的气温观测精度为0.1 °C，在-50~50 °C，误差范围需保持在±0.3 °C内；在-60~-50 °C与50~60 °C，误差范围应在±0.6 °C内。降水观测精度为0.25 mm，其误差范围需保持在±0.25 mm或是报告值的±2%。与气温和降水相比，其他主要变量的测量误差则要相对宽松，风速误差在±1 m/s或测量值的±2%；太阳总入射辐射误差在±70 W/m<sup>2</sup>，精度为10 W/m<sup>2</sup>；地表红外温度误差在±0.5 °C，最低精度为0.1 °C。

#### 5 启示和建议

##### 5.1 科学政治、科学认知与 USCRN 建设

在美国科学家主导下，20世纪末世界气象组织（WMO）气候学委员会制定出台了一套遴选全球陆地长序列地面气候观测台站网的“标准”（即GCOS/GSN遴选标准），选出1000个左右所谓“良好”台站，试图用以作为全球气候变化监测和检测的基准网<sup>[5-6]</sup>。但是，这个观测网实际上并没有达到“良好”标准，其中大部分台站仍然难以避免各种局地人为因素对关键气候变量观测记录的影响，在实际的全球和区域气候变化监测、研究中使用也不多，仍然采用各业务、研究机构原来发展的相对不那么“良好”、但密度更大的观测资料数据集<sup>[10]</sup>。从这个意义上说，GSN的规划不能说是成功的。

美国科学界对GSN网固有缺陷的认识是清楚的，就像对美国本土历史气候观测网（USHCN）存在的问题早就认识到一样<sup>[1-3]</sup>，但可能出于更复杂因素的考虑，对外仍一致声称GSN和USHCN有效、可用。另一方面，NOAA又投入巨量资金建设美国新的CRN。这看似矛盾的行动，其实并不难理解。建设USCRN不仅仅因为NOAA出于部门利益，为了扩大影响或者得到白宫和联邦政府的额外经费支持，而是美国科学界存在的关于气候变化幅度和速率的争论确实无法完全忽视，主流学者圈自己对于现有的美国历史气候观测网和长序列观测资料数据的可靠性也心存疑虑。建设USCRN，真实地反映了美国气候学界和相关部门决策者这种相互矛盾的处境和行为。

##### 5.2 USCRN 是国家气候观测系统建设的范例

美国USCRN建设的标准是目前世界上最高、最严格的，如果得到长期坚持和维护，将为解决气候变

化科学上的系列悬而未决的问题提供最终答案。这个高标准、严要求不仅体现在USCRN确定了很高的仪器测量精度、多重备份、持续不间断的动力保障和运行,而且主要表现在对站点周围不同空间尺度当前和未来观测环境质量的苛刻规定<sup>[11]</sup>。当前气候变化监测、检测和归因研究上的一个关键的问题是,现有长序列观测资料序列到底代表什么空间尺度的气候演化趋势?或者更具体地,它们是否能够代表区域以上空间尺度的长期气候演化趋势?这个问题存在,主要是因为全球几乎所有国家和地区的气象观测站一般都设在居民区或附近,随着城镇发展,这些观测点的微观和局地气候不可避免地受到城镇附近人类活动的影响,失去对于大尺度气候的代表性。

USCRN为所有国家气候观测系统建设提供了一个范例。中国现有气候观测网的地面气候要素记录同样存在城镇化影响问题,国内学者也一致认识到这种局地人为干预产生了长序列地面气温资料的系统偏差。中国气候观测系统建设方案曾经多次论证,但在若干关键科学和技术问题上仍存在不同意见。目前的突出问题是,有关部门认识到了重建国家气候观测系统的必要性,但在处理现有观测网和新建观测网以及站址代表性和维护便捷性的关系上,仍然意见不一,困难较大。USCRN的经验可以借鉴,但不一定全盘照搬。新的国家气候基准站网,完全可以在原有站网基础上设计和重建;只要彻底避开城镇环境,而且保证未来至少50年不受城镇化或其他局地人类活动影响,就可以规划建设一个高标准的、具有中国特色的国家级气候基准站网,为未来的气候、气候变化和环境演变研究、监测奠定基础。

### 5.3 USCRN 建设中的部门协调问题

USCRN建设过程中,涉及到各个部门之间的协调、合作。规划建设涉及到的政府部门包括内务部、地质调查局、国家公园服务中心、国家航空航天管理局、国务院、灾害控制和预防中心、联邦紧急事务管理局、国家天气服务中心、国家自然科学基金组织、农业部、国家资源保护中心、白宫科技政策办公室等。所有这些部门和单位都将为USCRN建设做出贡献,并从

中获得回报。国务院负责协调部门间国家气候变化应对事务,并负责协调国际气候谈判和国际合作事务,包括为GCOS计划等提供美国的经验和信息。

总体来说,各部门之间的协作是成功的。但部门之间的合作也带来了问题,例如,其他部门会不断要求扩展观测项目,比如农业部要求增加土壤水分、土壤温度和蒸发量观测,国家自然科学基金组织和能源部则要求测量温室气体和气溶胶等。这些需求和要求将增加建设、运行成本,明显改变了当初建设USCRN主要为解决地面气候观测系统偏差问题的初衷。为了促进计划成功,适当做出妥协是需要的,而且项目扩展后的观测资料,除了继续主要为气候异常和气候变化监测服务外,也的确可以在天气预报、农业气象服务、水文气象服务和商业活动中得到广泛应用,增加USCRN的实用价值。这些经验,对于我国未来发展新的中国基准气候观测网也具有一定借鉴意义。

#### 参考文献

- [1] Karl T R, Derr V E, Easterling D R, et al. Critical issues for long-term climate monitoring. *Climatic Change*, 1995, 31: 185-221.
- [2] Vose R S. Reference station networks for monitoring climatic change in the conterminous United States. *J Climate*, 2005, 18: 5390-5395.
- [3] Diamond H J, Karl T R, Palecki M A, et al. U.S. Climate Reference Network after one decade of operations: status and assessment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2013, 94: 485-498.
- [4] NRC. Adequacy of Climate Observing Systems. Washington: National Academy Press, 1999.
- [5] GCOS. Second report on the adequacy of the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC. Geneva: WMO/TD-1143, 2003.
- [6] Plummer N, Allsopp T, Lopez J A. Guidelines on climate observation net-works and systems. Geneva: WMO/TD-1185, 2003.
- [7] Vose R S, Menne M J. A method to determine station density requirements for climate observing networks. *J Climate*, 2004, 17: 2961-2970.
- [8] 任玉玉, 任国玉, 周江兴. 我国大陆大尺度气候观测网的理想密度和分布. *应用气象学报*, 2012, 23(2): 205-213.
- [9] Leroy M. The WMO intercomparison for present weather sensors. WMO/TD-877: Instruments and observing methods report No. 70, 1998: 19-22.
- [10] Ren Y Y, Ren G Y. Representativeness of four precipitation observational networks of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26(4): 454-466.
- [11] NOAA/NCDC. Climate Reference Network (CRN)-Site Information Handbook. NOAA-CRN/OSD-2002-0002R0UD0, 2002.