

淮河流域能量和水分循环观测系统及作用*

胡雯¹ 郑淋淋² 谢五三³ 霍彦峰^{4,5} 丁一汇⁶ 黄勇^{4,5}
HU Wen¹ ZHENG Linlin² XIE Wusan³ HUO Yanfeng^{4,5} DING Yihui⁶ HUANG Yong^{4,5}

1. 安徽省气象局, 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥, 230031
2. 安徽省气象台, 合肥, 230031
3. 安徽省气候中心, 合肥, 230031
4. 安徽省气象科学研究所, 合肥, 230031
5. 寿县国家气候观测台, 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 寿县, 232200
6. 国家气候中心, 北京, 100081

1. *Anhui Meteorological Bureau, Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China*
2. *Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031, China*
3. *Anhui Climate Center, Hefei 230031, China*
4. *Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China*
5. *Shouxian National Climatology Observatory, Huaihe River Basin Typical Farm Eco-meteorological Experiment Field of CMA, Shouxian 232200, China*
6. *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2020-06-01 收稿, 2020-08-24 改回。

胡雯, 郑淋淋, 谢五三, 霍彦峰, 丁一汇, 黄勇. 2020. 淮河流域能量和水分循环观测系统及作用. 气象学报, 78(5): 735-744

Hu Wen, Zheng Linlin, Xie Wusan, Huo Yanfeng, Ding Yihui, Huang Yong. 2020. The observational system of water and energy cycles in the Huaihe River Basin and its application. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(5):735-744

Abstract Huaihe River Basin is a transition zone of climate between the northern and southern of China, where meteorological disasters occur frequently. Water networks, farmlands, hills, mountains and towns are densely distributed in this region with complicated air-land interactions. The convergence of cold dry air and warm moist air occurs frequently, resulting in local or basin-scale disasters. The Huaihe River Basin is located in Meiyu area and is an important agricultural production base in China. There are comprehensive meteorological and hydrological observation systems in this region, and long-term meteorological and hydrological observational data have been obtained. Therefore, the Huaihe River Basin is an ideal experiment area for the study of water and energy cycles. The project "HUaihe river Basin energy and water cycle EXperiment (HUBEX)", which was sponsored by the National Natural Science Foundation of China, carried out a joint observation experiment of meteorology and hydrology in the Huaihe River Basin in the summers of 1998 and 1999. The present paper reviews the purpose of the HUBEX, the design and layout of the observation network, and introduces the development of observation network in the Huaihe River Basin based on HUBEX. The achievements and functions of the HUBEX are summarized from the perspectives of the mechanism study of regional climate events and rainstorms, the improvement of the model ability for simulation and prediction, and the establishment of long-term continuous meteorological observation dataset, etc.

* 资助课题: 国家重点研发项目(2016YFC0201900、2017YFC1502402)、安徽省公益性研究联动计划项目(1604f0804002)、国家自然科学基金项目(41705029)、安徽省自然科学基金项目(1908085MD109)。

作者简介: 胡雯, 主要从事云和降水监测研究。E-mail: Huwen-hw@163.net

通信作者: 郑淋淋, 主要从事中尺度气象研究。E-mail: zhengll.2@163.com

Key words HUBEX, Joint observation of meteorology and hydrology, Multi-scale comprehensive observation network, Meiyu front rainstorm, Regional coupled climate and hydrology model, Data assimilation

摘要 淮河流域是中国南北气候重要的过渡带,气象灾害频繁发生。这里水网、农田、丘陵、山地、城镇密布,地-气作用复杂,干冷与暖湿空气时常交汇于此,造成局地或流域旱涝经常发生。淮河流域处于梅雨区,且是中国重要的农业生产基地,具有气象和水文综合观测系统,积累了长序列的气象和水文观测资料。因此,淮河流域是研究能量和水分循环的理想试验区。国家自然科学基金重大项目“淮河流域能量与水分循环试验和研究(HUaihe river Basin Experiment,简称HUBEX)”于1998、1999年夏在淮河流域开展了气象和水文联合观测试验。文中回顾了HUBEX试验的目的、观测网设计与布局,介绍了HUBEX推动下的淮河流域综合观测网的发展,总结了HUBEX观测试验对区域气候事件和暴雨等灾害性天气机理研究、提高模式模拟和预报能力及建立长期连续的气象观测数据集等方面的成果和作用。

关键词 HUBEX, 气象水文联合观测, 多尺度综合观测网, 梅雨锋暴雨, 区域气候-水文耦合模式, 资料同化

中图法分类号 P426

1 引言

研究能量和水分循环具有重要意义。大气运动的能量主要来自太阳辐射和云雨过程的潜热释放,它们是气候变化的驱动因子。由于加热这一重要的强迫作用主要由气、液、固三态变化所支配,因此能量循环过程主要通过水循环来实现。鉴于能量循环和水循环的密切关系,且对气候问题十分重要,世界气象组织于1989年在世界气候研究计划(World Climate Research Project,简称WCRP)之下制定了全球能量和水循环试验计划(Global Energy and Water cycle EXperiment,简称GEWEX)。此计划目的是了解地球的水循环及地表、地下和大气中的能量通量,在此基础上改进模式中的陆面和水文过程描述,发展和改进气候系统模式,更好地预测全球气候变化(Lawford, 1999)。

为深入了解全球和区域能量与水循环变化及其对干旱和洪涝等气象灾害的影响,GEWEX在全球设立了5个试验区和5年(1995—2000年)的加强观测(Lawford, 1999),主要开展气象和水文综合观测。5个试验区包括:美国密西西比河流域的GEWEX大陆试验区(GCIP)、加拿大麦肯兹克GEWEX研究区域(MAGS)、欧洲波罗的海研究区域(BALTEX)、南美亚马逊河大尺度大气水汽平衡试验区(LBA)和亚洲季风试验区(GAME)(Lawford, 1999)。选择的依据是:(1)5个试验区能代表全球不同气候区的不同特征;(2)由于是气象和水文综合观测,这5个区域必须是全球具有代表性的流域区域;(3)具备气象、水文综合观测系统,并且具有足够长序列的历史观测资料(Coughlan, et al,

1996)。GEWEX在5个试验区建立了多尺度(小于 10 km^2 到大于 10^6 km^2)的气象和水文综合观测系统(Coughlan, et al, 1996),主要开展辐射和云、气象要素(降水、风、温度和湿度等)和水文等方面的观测(Chahine, 1992)。美国密西西比河流域GEWEX试验区目的是了解密西西比河流域能量和水分循环时、空变化特征的物理过程(Lawford, 1999),建立水资源变化的预报技术(Lawford, et al, 1999)。该试验建立了4层嵌套的观测网,包括:大陆尺度($>10^6\text{ km}^2$)、大尺度($10^5\text{—}10^6\text{ km}^2$)、中尺度($10^3\text{—}10^4\text{ km}^2$)和小尺度(小于 10 km^2 到 10^2 km^2)。采用大陆尺度的观测资料,发展气候-水文耦合模式,预报区域气候事件;采用大尺度观测资料,发展大气-水文耦合模式,进行模式评估、水分和能量收支研究;采用中尺度观测资料,发展中尺度模式,评估和优化中尺度模式;采用小尺度观测资料,建立模式次网格的观测数据,研究陆-气相互作用过程(Coughlan, et al, 1996)。

淮河流域地处梅雨区,且是中国重要的农业生产基地,具有气象和水文综合观测系统,积累了长序列的气象和水文观测资料,非常符合GEWEX试验区标准。但作为研究东亚季风关键区域之一的淮河流域在能量和水循环观测方面长期空白。1997年,受国家自然科学基金重大项目资助开展“淮河流域能量与水分循环试验和研究(HUaihe River Basin EXperiment,简称HUBEX)”(周小刚等,2004),其目的是研究季风系统对全球能量和水分循环及气候系统的影响(Yasunari, 1994)。1998、1999年夏季在淮河流域开展三层尺度嵌套的气象和水文联合观测,以期获得该区域的能量和水分循

环规律,揭示这一地区旱、涝形成机制,建立气候-水文耦合模式,提高对灾害性天气的预测水平(徐慧等,1999b)。

2 HUBEX 观测目的及观测网布局

2.1 观测目的

淮河流域能量与水循环试验的主要科学目标为:利用外场科学试验所获得的气象、水文、雷达、卫星遥感等加密与特殊观测资料,研究东亚(主要是梅雨区)多尺度降水系统能量与水分循环过程,及它们与陆面过程的相互作用;建立区域气候-水文数值模式及其资料同化系统,提高气候模拟和预测能力(徐慧等,1999a)。具体目标为(张雁,1998):

(1)通过收集常规和加密的气象、水文观测资料,以及雷达、卫星遥感和微波辐射、通量等特殊观测资料,建立淮河流域气象、水文资料数据库。

(2)采用观测试验获得的各种资料进行四维同化研究,建立四维资料同化系统,为能量与水循环过程、陆面过程研究和区域气候-水文模式的研究提供更准确的初始场。

(3)进一步了解梅雨中尺度云系的水循环过程、辐射过程及其与陆面过程的相互作用,改进物理参数化方案。

(4)研究淮河流域陆面过程特征,特别是云与辐射过程在能量和水循环中的作用。为区域气候-水文模式的物理过程和参数化方案设计提供理论

和试验研究依据。

(5)建立一个以淮河流域为中心具有较好模拟能力的区域气候-水文模式。

2.2 观测网设计与布局

根据试验的科学目标,HUBEX 观测系统由3部分组成:大气观测系统、水文观测系统、寿县综合观测站特殊观测系统(张雁,2000)。

为了研究淮河流域梅雨期多尺度降水与能量、水分循环过程,设计了HUBEX 试验区3种尺度嵌套的大气观测系统(表1)。大气观测时间分为加强监测期(5—8月)和加密观测期(6月中旬—7月下旬)(张雁,2000),重点监测梅雨区大气系统的多尺度特征。 α 尺度观测区为(28°—40°N,110°—122°E),约1200 km×1500 km,包括地面和高空常规观测,观测频次地面每日超过4次,高空每日2次:08和20时(北京时,下同)。 β 尺度观测区以淮河流域高空探测网为界,包括南京、安庆、武汉、南阳、郑州、济南、青岛、射阳,约为700 km×500 km,由8部(徐州、南京、射阳、南通、阜阳、寿县、淮南、凤台)雷达和3个(寿县、淮南、凤台)自动雨量计、雨强计、雨滴谱计和卫星接收系统组成。江苏4部(徐州、南京、射阳、南通)雷达观测频次为每日4次(02、08、14、20时)。安徽4部(阜阳、寿县、淮南、凤台)雷达观测频次为逐时(每日24次),与其配合的寿县、淮南、凤台自动雨量计、雨强计和雨滴谱计观测频次均为逐时。根据淮河流域的自然地理和水文气象特征,以及流域内水文气象观测

表1 HUBEX 观测系统布局及目标
Table 1 The layout and objective of the HUBEX

观测系统	观测网尺度	观测平台	观测目的
大气观测系统	α 尺度	1. 地面常规观测 2. 高空常规/加密观测 3. 卫星观测(静止、极轨和TRMM卫星)	区域气候事件的机制研究;梅雨锋系统云系的 α 中尺度结构特征;梅雨锋暴雨的机制研究
	β 尺度	雷达观测(数字化天气雷达和多普勒雷达)	研究 β 尺度云、降水系统的演变;改进中尺度模式资料同化系统
	γ 尺度	1. 地面加密观测 2. 雨量计、雨强计、雨滴谱计	建立史灌河流域数字水文模型;改进陆面过程模式;检验和改进气候-水文耦合模式
水文观测系统		1. 史灌河流域雨量、蒸发、水位、流量、地下水、土壤含水量等观测 2. 巡回通量观测	建立史灌河流域数字水文模型;改进陆面过程模式;检验和改进气候-水文耦合模式
寿县综合观测站特殊观测系统	单站观测	1. 地面加密观测 2. 卫星、雷达 3. 辐射、双通道微波遥感、边界层通量梯度、鲍恩比、涡动	同一地点气象、水文、雷达、辐射和卫星综合观测资料,检验和改进陆面过程模式;了解能量和水循环过程的单点时间演变

网状况, γ 尺度观测区设在阜阳、蚌埠、合肥、六安和金寨, 约为 $140 \text{ km} \times 150 \text{ km}$, 包括地面加密观测和自计雨量观测, 观测频次也是逐时。

为了解淮河以南丘陵地区的水文、气象特征, 配合大气观测系统的 γ 尺度观测区, 将水文试验区设在史灌河流域($31^{\circ}12' - 31^{\circ}18' \text{N}$, $115^{\circ}17' - 115^{\circ}58' \text{E}$), 史灌河是淮河流域的重要支流(张雁, 1998)。与大气观测网观测配合, 水文观测期为 1998 年 5 月 15 日—9 月 15 日, 1999 年 5—8 月。包括雨量、蒸发、水位、流量、地下水位、土壤含水量、水库要素、洪水要素、堰闸要素和巡回通量观测。日本自动通量观测系统用来对史灌河流域 4 种不同陆面条件下(旱地、水田、森林和水体)的通量进行观测(张雁, 1998)。降水、蒸发、土壤含水量、地下水位等水文资料用于建立史灌河流域数字水文模型。结合地面、土壤、不同陆面通量观测, 研究不同下垫面与大气的能量交换过程, 改进陆面过程模式。

寿县综合观测站特殊观测系统在寿县气象站设置单点特殊观测, 该站位于大气观测系统 α 、 β 和 γ 三层网格的中心, 是 HUBEX 综合观测基地。1998 和 1999 年加密观测期间, 进行了气象、水文、雷达、辐射和卫星等多种综合观测, 为检验陆面过程模式及全面了解能量与水循环的单点时间演变过程提供观测资料。

2.3 HUBEX 观测系统发展

第一次 HUBEX 观测试验, 建立了 3 种尺度嵌套的淮河流域综合观测网。在 HUBEX 的基础上, 随着对大气过程认识的逐步深入, 在不同时期开展了有针对性的综合观测试验。主要在大气边界层过程、气溶胶对云和气候的影响、暴雨等强对流结构研究等方面开展了相关的科学试验。

为研究陆面过程和大气边界层过程对数值模式的影响及中国淮河流域旱涝的物理机制, 2003—2006 年开展了中日合作“低层大气通量与降水研究(LAPS)”(张雁, 2005), 增加了多普勒风廓线仪(启动了温、湿度观测)、多普勒雷达、边界层通量观测铁塔、微波辐射仪、自动通量观测站等仪器。重点开展温、湿度垂直观测、边界层通量及陆面与大气的通量观测, 获取淮河流域异常状况和大气边界层的高分辨率资料, 对中国旱涝物理成因和预报技术的研究与应用起到了重要作用。为研究中国南方暴雨的中尺度特征与机理, 2004—2009 年开展

了“南方暴雨野外科学试验”(倪允琪等, 2006, 2013; 崔春光等, 2011), 基于双多普勒雷达观测、双偏振雷达、卫星观测等天-空-地基移动观测, 获取高时、空分辨率资料, 对掌握中尺度暴雨系统结构和机理、提高中尺度灾害天气监测预警能力有重要意义。2008 年, 为研究气溶胶与云、降水过程之间的相互作用, 中美合作开展了“大气辐射综合观测试验研究(ARM)”(邱玉珺等, 2012), 利用大气辐射测量移动设备(AMF)和辅助设备(AAF)观测的云、气溶胶和大气参数等资料, 针对大气气溶胶对云和气候的影响进行研究。

在 HUBEX 等多个大型科学试验和气象业务科技发展的双重推动下, 淮河流域综合观测系统得到快速发展, 目前已基本建成较为完备的多尺度嵌套综合观测网, 由嵌套的 α 、 β 和 γ 中尺度观测区构成, 观测网主要包括: 气象业务观测网和寿县国家气候观测台(图 1)。具体如下:

(1) 地面常规观测包括: 寿县站和周边区域自动监测站网。寿县站观测设备包括: 自动气象站(双套)、辐射站、能见度仪、蒸发皿、降水现象仪、雪深仪、草面温度、地温。

(2) 农田多要素观测包括: 土壤湿度观测, 农田小气候观测, 农作物光谱、光合作用、蒸腾作用和生育期的观测, 在 32 m 观测铁塔上, 建设土壤和通量观测设备, 主要包括: 土壤湿度(5 层)、土壤温度(5 层)、三维超声风速仪、 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2/\text{CH}_4$ 分析仪、四分量/光合有效辐射、风向、风速。

(3) 大气环境观测设备包括: 气溶胶激光雷达、颗粒物质量浓度在线分析仪、7 波段碳黑度仪、3 波段浊度仪、9 波段太阳光度计、 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪、 SO_2 分析仪、CO 测定仪以及臭氧分析仪。

(4) 地基和空基遥感探测系统。地基遥感探测系统由建设在野外科学观测研究站的地基雷达和 SA 业务雷达网、试验雷达网组成; 野外科学观测研究站雷达包括: 气溶胶激光雷达、边界层风廓线雷达、毫米波云雷达、C 波段连续波雷达、MRR 微雨雷达; 试验雷达网为以野外科学观测研究站为中心构建的 3 部 C 波段双偏振雷达观测网(位于寿县和淮南的 2 部固定雷达, 以及 1 部移动雷达)。空基遥感探测数据主要通过网络从安徽省 FY3 直接站(长丰县)和 FY4 直接站(淮南)接收静止和极轨气象卫星的观测数据。

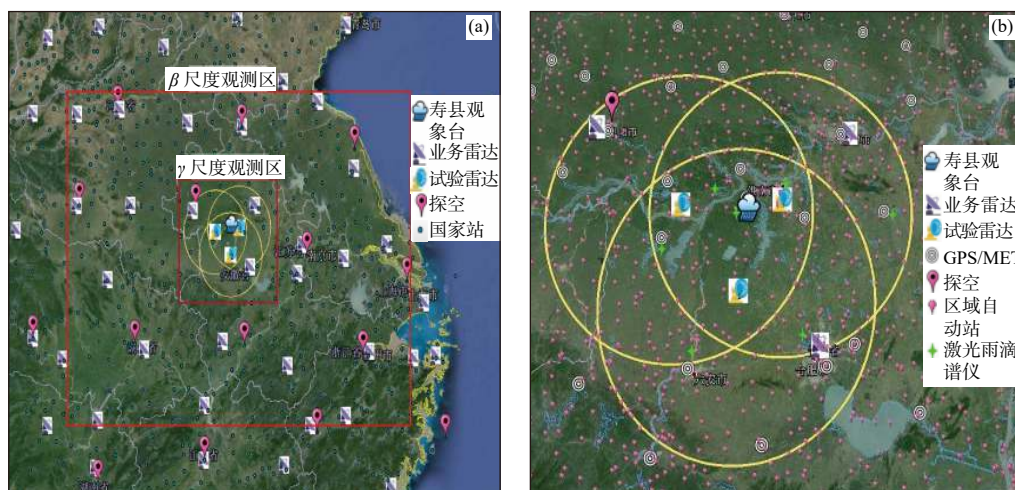


图 1 淮河流域综合气象观测网 (a. 淮河流域, b. a 中的 γ 中尺度观测区)

Fig. 1 Comprehensive meteorological observation network in the Huaihe River Basin
(a. the Huaihe River Basin, b. this panel is the meso- γ observational region shown in (a))

3 HUBEX 观测系统的作用

利用第一次 HUBEX 试验获得的观测资料在区域气候事件机理、梅雨期降水多尺度特征及区域气候-水文耦合模式等方面开展了相关研究,取得的丰硕成果不仅推动了区域气候事件和暴雨等灾害性天气机理研究,且提高了模式模拟和预报能力,同时也为建立长期、连续的气象观测数据集奠定了坚实基础。

3.1 建立区域长期和连续气象观测数据集

第一次 HUBEX 观测试验获得了多种常规、加密和特殊的气象、水文综合观测资料,建立了 3 类数据集:不同天气-气候背景下梅雨区能量与水分循环过程观测、陆面过程观测及边界层观测。

不同天气-气候背景下梅雨区能量与水分循环过程观测:1998 年夏季暴雨期和干旱期淮河流域能量与水分循环过程的气象和水文观测资料,用于旱、涝时期气候与水文特征对比研究;1999 年江淮梅雨暴发和集中期以及江淮流域持续低温多降水过程观测,对于研究厄尔尼诺年和拉尼娜年江淮梅雨的主要影响机制有重要意义;利用多普勒雷达和数字化天气雷达进行中、小尺度高时空降水与水文观测,研究梅雨时期多尺度云系的三维结构及全部生命史,为江淮流域梅雨锋降水云系的观测和研究提供丰富的观测数据。

陆面过程观测:东亚夏季风单站综合陆-气通

量观测数据集为验证季风区的陆面过程模式以及全面了解能量与水循环过程的单站时间演变提供宝贵资料;淮河流域不同季节、不同下垫面条件下的地气动量、热量和水汽通量数据对于研究陆面过程、改进水文模式具有很高的价值。

边界层观测:大范围、长时间序列、加密的低空探空观测数据为研究不同天气气候条件下低空急流、低层水汽输送,计算边界层的动量和感热、水汽通量提供重要数据。

此外,自 20 世纪 50 年代以来,以寿县国家气候观象台为中心的淮河流域综合观测系统,通过 60 多年综合气象观测和 20 多年各类重大科学试验观测,积累了长期、连续、稳定的地面、通量、辐射、遥感、农田生态以及大气成分等气象观测资料以及大量的科学试验资料(田红等,2011;谢五三等,2009;童应祥等,2010;朱治林等,2001)。主要包括:气象要素观测数据集、农业气象观测数据集、大田土壤湿度数据集、边界层梯度气象观测数据集、农田生态系统通量观测数据集、物候观测数据集、基准辐射观测数据集、地下水位数据集、大气成分观测数据集、卫星遥感观测数据集、地基遥感观测数据集等(表 2),数据量达 PB 级别。

3.2 区域气候事件机理研究

淮河流域是中国南北气候、高低纬度和海陆相接 3 种过渡带的重叠区域,天气、气候复杂多变,形成了“无降水旱,有降水涝,强降水洪”的典型区域

表 2 淮河流域综合气象观测网基础数据情况

Table 2 Basic data collected by the comprehensive meteorological observation network in the Huaihe River Basin

数据集名称	资料内容(元数据、设备信息、数据集使用说明等)	采集起始时间
人工气象报表	气压、空气温湿度、地表及土壤温度、冻土深度、降水量、蒸发量、天气现象	1955年1月
基准气象站数据	气压、气温(平均、最高、最低)、草温、水汽压、降水量、蒸发量、风向、风速、空气相对湿度、露点温度、云量、能见度、冻土深度、地温(地面、5、10、15、20、40、80、160、320 cm)、土壤湿度(10、20、40、80、160 cm)、日照时数、积雪(雪深、雪压)、冻土深度、电线积冰	2005年1月
大田农学观测数据	夏玉米-冬小麦发育期、收获期考种	1982年1月
大田土壤湿度数据	5 cm及10—100 cm土层每10 cm 一层重量含水率	1982年1月
边界层梯度站数据	5层(30、20、10、2、1 m)空气温、湿度和风速、风向、5层土壤温度、9层土壤湿度、1层净辐射、向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射、光合有效辐射和土壤热通量	2007年7月
通量数据	三维风速、CO ₂ 密度和水汽密度、农田生态系统——大气感热、潜热、动量、H ₂ O、CO ₂ 、CH ₄ 通量	2007年7月
物候资料	木本植物物候期和水文、动物物候期	1985年1月
基准辐射数据	总辐射、直接辐射、散射辐射、反射辐射、大气长波辐射、地球长波辐射、净辐射、紫外线、光合有效辐射	2014年1月
地下水位数据	地下水位	1982年1月
大气成分数据	气溶胶(质量浓度、光学特征、垂直廓线)、黑炭、CO、SO ₂ 、O ₃ 、NO _x 、反应性气体体浓度	2014年1月
卫星遥感数据	NOAA系列、FY-1、FY-3极轨气象卫星及MODIS卫星资料、GMS-5及FY-2、FY-4等静止气象卫星资料,以及2000年以来高分辨率卫星资料	1996年1月
地基遥感数据	气溶胶激光雷达、边界层风廓线雷达、微波辐射计、C波段连续波雷达、MRR微雨雷达、周边SA业务雷达网、双偏振雷达等	2015年1月

旱涝特征,“旱涝急转”和“旱涝交替”现象时有发生(姜健俊, 2018; 程智等, 2012; 高超等, 2019; 徐敏等, 2013)。淮河流域多尺度相嵌套的综合观测网的建立,积累了长期、连续、稳定的气象观测资料以及大量的科学试验资料,为淮河流域各类区域气候事件的机理研究提供了数据支撑。

通过对能量和水分循环过程的综合观测,研究能量和水分循环对旱、涝的影响程度及其机制,开展旱、涝灾害致灾过程及机理综合观测试验,研究旱、涝形成的关键驱动因子和物理机制(图2)。通过陆面参数反演和陆面过程描述,优化陆-气交换过程参数。利用地面采样分析、垂直探空以及地基和空基遥感等多种观测技术,开展气溶胶、反应性气体的连续、综合、立体观测,揭示气溶胶变化特征,以及气溶胶-云-降水的相互作用,改善中国东部地区气溶胶分布及其变化在气候模式中的参数化方案,研究淮河流域大气污染与旱、涝灾害之间的相互关系与物理机制,分析气候变化和空气污染双重影响下旱、涝灾害的变化规律及其主要机制。基于高密度地面气象观测站网和气象卫星、移动天气雷达等天基-空基-地基一体化的实时、立体综合观测,对旱、涝所涉及的地球系统中若干过程(包括大

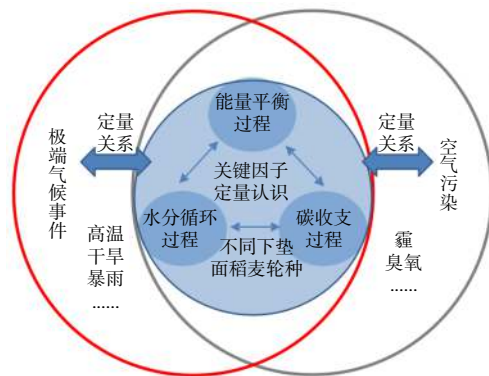


图 2 能量与碳水循环的物理过程和途径

Fig. 2 Physical processes and approaches of energy, carbon and water cycles

气热力和动力过程、陆面过程、云和降水微物理过程、大气化学过程等)的相关参数进行同步、集成、高分辨率实时观测研究,从整体上监测区域气候与环境变化,同时有利于对相关物理过程观测参数相互作用机制的认识和理解。

3.3 梅雨期降水多尺度特征

1998年是极强厄尔尼诺次年,长江流域出现了40年一遇的全流域大洪水;1999年为拉尼娜年,长江下游出现了严重的洪涝。HUBEX试验就是在

这样的背景下进行的(丁一汇等, 1999)。HUBEX 试验对地面、探空、雷达、卫星等多种特殊观测项目进行了加密观测, 成功观测到长江及淮河流域地区梅雨爆发前后、梅雨期间及第 2 次入梅不同天气条件下的重要降水天气系统, 在暴雨天气过程机理研究方面取得了很多成果。Ding 等(2001)分析了 HUBEX 期间大尺度环流特点及天气系统。很多学者(王亚非等, 1999; 徐祥德等, 1999; 张雁等, 2001)从大尺度环流方面探索了长江、淮河流域梅雨锋出现持续降水的原因。张雁等(2001)揭示了持续性暴雨的环流背景: 副热带高压阶段性西进、滞留和东撤直接影响低空急流水汽输送及降水强度(图 3c); 华北高压坝的建立有利于切变线北侧维持偏东风, 对锋区稳定起重要作用(图 3a); 青藏高原南侧生成的低涡沿切变线东移过程中逐渐加强, 加剧梅雨锋对流活动和降水加强(图 3a、b)。同时, 暴雨中尺度机理方面也有突破性进展。利用多普勒和数字化天气雷达进行中、小尺度高时空分辨率的观测, 得到梅雨期多尺度云系的三维结构及全部生命史(张卫平等, 2001; 李柏等, 2001)。利用 TRMM 等卫星和雷达探测资料, 反演和提出了淮河流域梅雨锋系统中的中尺度云雨结构特征(刘健等, 2007; 仪清菊等, 2001), 为深入了解梅雨锋暴雨的形成机制

和提高暴雨预报提供了重要的物理依据。

3.4 区域大气-水文耦合模式预报洪水的作用

HUBEX 期间, 中国科学家利用所获得的试验数据改进了气候模式中的陆面过程, 研制出了新的陆面过程和水文模型, 并且进行了气候模式和水文模型的耦合研究。陆面过程通过与大气的热量、动量和水分交换来影响大气的动力和物理过程, 在气候变异及水资源变化中起到了重要作用(戴永久等, 1999)。陆面过程的正确表述可以提高模式气候预测能力。林朝晖等(1999)通过改善地表反照率参数化方案, 对短期气候距平预测系统(IAP PSSCA)进行了改进。HUBEX 期间, 对史灌河流域进行了加密观测, 得到了降水量、蒸发量、水位、流量、地下水和土壤含水量等资料。采用这些珍贵的水文观测资料结合历史资料, 引入有关水文模型, 探索流域下垫面水文过程, 为完成该地区气候和水文耦合模式打下了基础(徐慧等, 1999a), 中国水文部门最早发展和应用的陆-气-水文模式之一是新安江模型。郝振纯等(1999)以新安江流域水文模型为基础, 建立了适合与大气模式耦合的分布式水文模型。在此基础上, 任立良等(2001)建立了史灌河流域水文模型, 并通过 HUBEX 试验得到的观测资料进行检验, 结果表明模型能够很好模拟洪水的涨落过程(见任立良等(2001)图 2、3)。

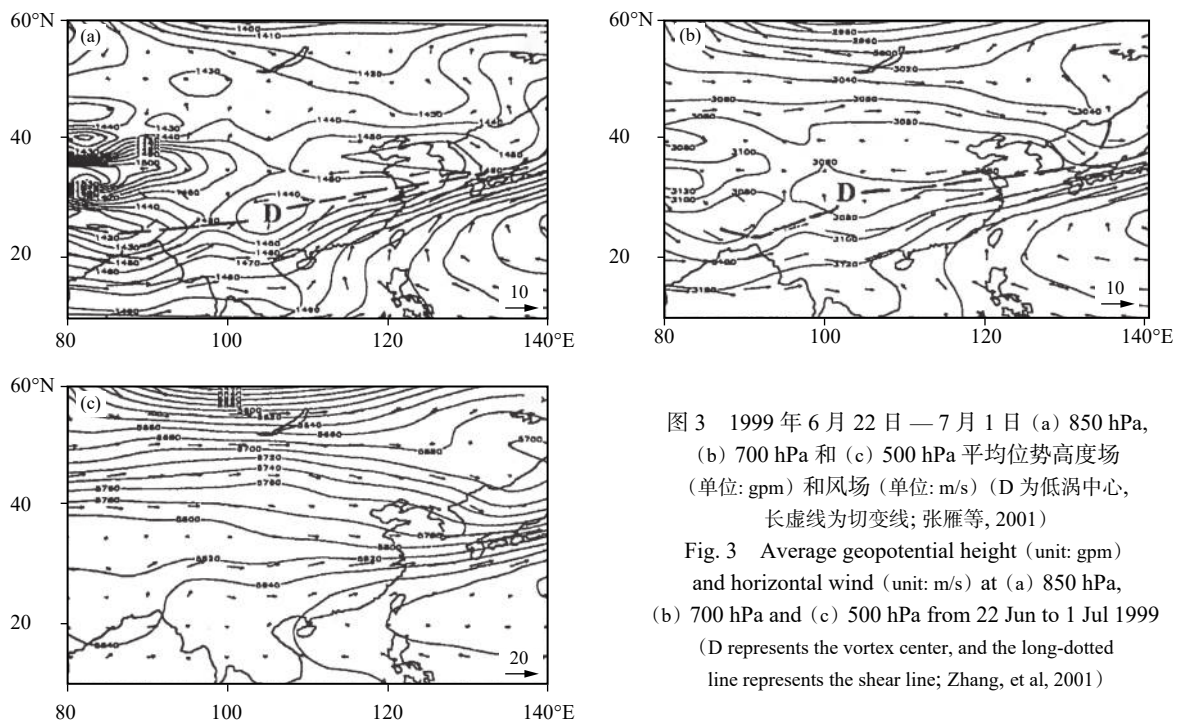


图 3 1999 年 6 月 22 日—7 月 1 日 (a) 850 hPa, (b) 700 hPa 和 (c) 500 hPa 平均位势高度场 (单位: gpm) 和风场 (单位: m/s) (D 为低涡中心, 长虚线为切变线; 张雁等, 2001)

Fig. 3 Average geopotential height (unit: gpm) and horizontal wind (unit: m/s) at (a) 850 hPa, (b) 700 hPa and (c) 500 hPa from 22 Jun to 1 Jul 1999 (D represents the vortex center, and the long-dotted line represents the shear line; Zhang, et al, 2001)

中尺度模式是短期暴雨预报的重要支撑技术。提升中尺度模式的预报能力,对于准确把握暴雨落区、强度和发生时间至关重要。HUBEX 试验中取得的非常规观测和加密观测资料,在中尺度数值模式资料同化技术中得到广泛应用,在暴雨数值模拟中取得良好效果。在中尺度模式中同化雷达反射率(朱民等,1999; Guo, et al, 2000)和卫星资料(程兴无等,2001; 徐枝芳等,2004)明显改善了梅雨暴雨过程的模拟效果,因此提高中尺度模式初始场的 β 中尺度信息的提取水平对于成功模拟暴雨中尺度系统非常重要,有利于研究梅雨锋系统的 β 中尺度结构,提高降水预报技术,促进梅雨锋多尺度系统及其相互作用的研究,有利于进一步认识淮河流域梅雨锋区多尺度云系的能量与水分循环过程。同时,研发的 HUBEX 区域资料同化系统,同化 HUBEX 加密观测资料,可明显改进模式的预报效果(见朱宗申等(2002)图 3)。

4 HUBEX 观测系统设计思考

20 世纪末的 HUBEX 试验是一次气象和水文部门的联合观测试验。前面回顾了当时的观测网设计、布局及完成情况,从当时对水分和能量循环的科学认识和技术水平看, HUBEX 试验设计是成功的,对东亚典型季风区梅雨期能量和水分循环的科学问题取得了重要突破。HUBEX 试验观测期处于特殊气候背景下,1998 年是极强厄尔尼诺次年,长江流域发生了特大范围暴雨和洪水灾害(Ding, et al, 2001, 2011),1999 年是拉尼娜年,长江中下游地区出现了建国以来的最强洪水, HUBEX 试验布局了完善的天气尺度观测网,为深入研究特殊气候背景下梅雨区水分和能量循环的天气、气候机制提供了完备的观测资料。HUBEX 充分运用了当时先进的观测手段,并且设计的多尺度嵌套的综合观测网,为研究梅雨锋的中小尺度的结构特征、水分和能量循环过程提供了丰富的观测资料。为充分发挥防灾减灾作用,气象和水文部门联合观测和研究得到深入开展,研发的气候-水文耦合模式,为洪水预报提供技术支撑。这些 HUBEX 试验的成功之处对于即将开展的二期试验具有重要指导意义。

随着天气、气候条件的改变、人类活动引发的大气环境条件和下垫面特征的改变、对能量和水分

循环认识的不断深入、观测和研究手段的不断进步和防灾减灾的现实需求,二期试验观测系统设计应充分考虑这些影响因素。充分认识观测背景的改变,在全球气候变化和人类活动影响的背景条件下,由此造成的天气、气候条件的改变、大气环境条件和下垫面条件的改变,在二期气象和水文综合观测的基础上,依托逐渐发展成熟的寿县国家观象台,发展气象、水文、大气环境和边界层综合观测网,研究全新背景下多种因素对能量和水分循环的影响。明确观测目的,为满足旱涝防灾减灾需求,保障淮河流域农业、生态和经济社会健康发展,重点针对新背景下淮河流域能量和水分循环、旱涝机制等科学问题开展研究。基于观测目的,进一步开展多平台、多手段协同观测,以综合观测为基础,加强气象、水文、大气环境和生态等学科交叉融合,解决能量和水分循环中的重点和难点科学问题。

参考文献

- 程兴无,梁树献,徐慧等. 2001. HUBEX 期间暴雨模拟研究. *气候与环境研究*, 6(2): 186-190. Cheng X W, Liang S X, Xu H, et al. 2001. Numerical simulation of heavy rain in HUBEX period. *Climatic Environ Res*, 6(2): 186-190 (in Chinese)
- 程智,徐敏,罗连升等. 2012. 淮河流域旱涝急转气候特征研究. *水文*, 32(1): 73-79. Cheng Z, Xu M, Luo L S, et al. 2012. Climate characteristics of drought-flood abrupt change events in Huaihe River Basin. *J China Hydrol*, 32(1): 73-79 (in Chinese)
- 崔春光,倪允琪,李红莉等. 2011. 中国南方暴雨野外试验中尺度气象分析场的建立及其质量评估. *气象学报*, 69(1): 26-40. Cui C, Ni Y, Li H, et al. 2011. The establishment and quality evaluation of the meso-scale analysis field based on the southern China torrential rainfall experiment. *Acta Meteor Sinica*, 69(1): 26-40 (in Chinese)
- 戴永久,谢正辉,林朝晖等. 1999. 陆面物理过程模式 IAP94 简介//赵柏林,丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京:气象出版社, 214-220. Dai Y J, Xie Z H, Lin Z H, et al. 1999. Brief description of IAP land surface model IAP94//Zhao B L, Ding Y H. Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1). Beijing: China Meteorological Press, 214-220 (in Chinese)
- 丁一汇,张雁,马强. 1999. 1998 年夏淮河流域试验加密观测期间主要天气形势特点及其重要观测成果//赵柏林,丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京:气象出版社, 1-11. Ding Y H, Zhang Y, Ma Q. 1999. Characteristics of weather situation during the HUBEX period in 1998 and important observational results//Zhao B L, Ding Y H. Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1). Beijing: Meteorological Press, 1-11 (in Chinese)
- 高超,尹周祥,李学文. 2019. 淮河流域近 545 年旱涝等级序列完善及变化

- 特征分析. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 40(2): 7-15. Gao C, Yin Z X, Li X W. 2019. Perfection and variation characteristics of drought-flood grade series in Huaihe River Basin during the past 545 years. *J North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 40(2): 7-15 (in Chinese)
- 郝振纯, 任立良, 刘新仁. 1999. 陆气耦合水文模式研究//赵柏林, 丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社, 237-245. Hao Z C, Ren L L, Liu X R. 1999. Hydrological modeling in the coupled land-atmospheric model//Zhao B L, Ding Y H. Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1). Beijing: China Meteorological Press, 237-245 (in Chinese)
- 姜健俊. 2018. 淮河流域水生态问题思考和对策建议. *治淮*, (2): 47-49.
- Jiang J J. 2018. Water ecological problems and countermeasures in Huaihe River Basin. *ZhiHuai*, (2): 47-49 (in Chinese)
- 李柏, 曹性善, 周昆等. 2001. 江淮梅雨锋暴雨过程中尺度系统的演变及结构特征分析与研究. *气候与环境研究*, 6(2): 168-172. Li B, Cao X S, Zhou K, et al. 2001. The Analysis and research to the evolution and structure characters of the mesoscale systems during the Meiyu front heavy rain processes. *Climatic Environ Res*, 6(2): 168-172 (in Chinese)
- 林朝晖, 李旭, 赵彦等. 1999. 气候模式中陆面过程的改善对 IAP PSSCA 预测技巧的影响//赵柏林, 丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社, 187-200. Lin Z H, Li X, Zhao Y, et al. 1999. The impact of land surface processes on the predictive skill of IAP prediction system for short-term climate anomaly//Zhao B L, Ding Y H. Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1). Beijing: China Meteorological Press, 187-200 (in Chinese)
- 刘健, 张文建, 朱元竞等. 2007. 中尺度强暴雨云团云特征的多种卫星资料综合分析. *应用气象学报*, 18(2): 158-164. Liu J, Zhang W J, Zhu Y J, et al. 2007. Case study on cloud properties of heavy rainfall based upon satellite data. *J Appl Meteor Sci*, 18(2): 158-164 (in Chinese)
- 倪允琪, 周秀骥, 张人禾等. 2006. 我国南方暴雨的试验与研究. *应用气象学报*, 17(6): 690-704. Ni Y, Zhou X, Zhang R, et al. 2006. Experiments and studies for heavy rainfall in southern China. *J Appl Meteor Sci*, 17(6): 690-704 (in Chinese)
- 倪允琪, 张人禾, 刘黎平等. 2013. 中国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX). 北京: 气象出版社. Ni Y Q, Zhang R H, Liu L P, et al. 2013. South China heavy rainfall field experiment. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 邱玉珺, 杨会文, 倪婷等. 2012. 基于美国 AMF 寿县观测的云特性研究. *大气科学学报*, 35(1): 80-86. Qiu Y J, Yang H W, Ni T, et al. 2012. Cloud property analysis by using DOE AMF measurements in Shouxian of China. *Trans Atmos Sci*, 35(1): 80-86 (in Chinese)
- 任立良, 刘新仁. 2001. 基于 1998/1999 年 HUBEX 强化观测资料的水文过程模拟. *气候与环境研究*, 6(2): 255-260. Ren L L, Liu X R. 2001. Hydrological processes modeling based on HUBEX data in 1998/1999. *Climatic Environ Res*, 6(2): 255-260 (in Chinese)
- 田红, 伍琼, 童应祥. 2011. 安徽省寿县农田能量平衡评价. *应用气象学报*, 22(3): 356-361. Tian H, Wu Q, Tong Y X. 2011. Evaluation on energy balance of farmland in Shouxian County of Anhui province. *J Appl Meteor Sci*, 22(3): 356-361 (in Chinese)
- 童应祥, 王东, 田红等. 2010. 淮河流域农田光合有效辐射(PAR)的基本特征. *中国农学通报*, 26(23): 331-335. Tong Y X, Wang D, Tian H, et al. 2010. Basic features of photosynthetic active radiation over cropland in Huaihe valley. *Chinese Agric Sci Bull*, 26(23): 331-335 (in Chinese)
- 王亚非, 沈文梅, 宋永加. 1998. 年长江淮河流域梅雨锋持续降水背景初探//赵柏林, 丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社, 20-27. Wang Y F, Shen W M, Song Y J. 1999. Possible causation of long persistent precipitation around the Yangtze-Huaihe River Basin in 1998//Zhao B L, Ding Y H. Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1). Beijing: China Meteorological Press, 20-27 (in Chinese)
- 谢五三, 田红, 童应祥等. 2009. 基于淮河流域农田生态系统观测资料的通量研究. *气象科技*, 37(5): 601-606. Xie W S, Tian H, Tong Y X, et al. 2009. Flux of cropland ecosystem in Huaihe River Basin. *Meteor Sci Technol*, 37(5): 601-606 (in Chinese)
- 徐敏, 丁小俊, 罗连升等. 2013. 淮河流域夏季旱涝急转的低频环流成因. *气象学报*, 71(1): 86-95. Xu M, Ding X, Luo L, et al. 2013. A possible cause of the low frequency circulation of summer-time drought-flood abrupt alternation over the Huaihe River basin. *Acta Meteor Sinica*, 71(1): 86-95 (in Chinese)
- 徐慧, 钱名开. 1999a. 淮河流域能量与水分循环试验和研究进展. *治淮*, (5): 21-23. Xu H, Qian M K. 1999a. Research progress of energy and water cycle experiment over Huaihe River Basin. *ZhiHuai*, (5): 21-23 (in Chinese)
- 徐慧, 钱名开, 杨民钦. 1999b. 淮河史灌河流域加密观测主要水文要素初步分析//赵柏林, 丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社, 175-181. Xu H, Qian M K, Yang M Q. 1999b. A preliminary analysis of intensive hydrological observation data in the Shiguan River catchment of the Huaihe River basin//Zhao B L, Ding Y H. Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1). Beijing: China Meteorological Press, 175-181 (in Chinese)
- 徐祥德, 张雪金, 姚文清. 1999. 1998 年梅雨期区域边界“水汽流”特征及其对长江流域持续特大暴雨影响//赵柏林, 丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社, 12-19. Xu X D, Zhang X J, Yao W Q. 1999. The characteristic of "water vapor stream" at the edge of region during Meiyu period of 1998 and its effects on the sustained exceptional torrential rain in Changjiang River basin//Zhao B L, Ding Y H. Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1). Beijing: China Meteorological Press, 12-19 (in Chinese)
- 徐枝芳, 葛文忠, 党人庆等. 2004. TRMM/PR 资料在中尺度模式中的应用. *高原气象*, 23(5): 635-642. Xu Z F, Ge W Z, Dang R Q, et al. 2004. Application of TRMM precipitation radar data to meso-scale model MM5. *Plateau Meteor*, 23(5): 635-642 (in Chinese)
- 仪清菊, 徐祥德. 2001. 不同尺度云团系统上下游的传播与 1998 年长江流

- 域大暴雨. *气候与环境研究*, 6(2): 139-145. Yi Q J, Xu X D. 2001. The propagation and development of cloud cluster systems and severe precipitation event in 1998. *Climatic Environ Res*, 6(2): 139-145 (in Chinese)
- 张卫平, 郎需兴, 徐晖等. 2001. 梅雨锋云系内对流回波与层状回波的研究. *气象科学*, 21(1): 9-18. Zhang W P, Lang X X, Xu H, et al. 2001. A study on the convective and stratiform clouds of Mei-yu front by use of radar field data. *Scientia Meteor Sinica*, 21(1): 9-18 (in Chinese)
- 张雁. 1998. 淮河流域能量与水分循环试验和研究. *气象科技*, (4): 33-38. Zhang Y. 1998. The experiment and research of energy and water cycle over the Huaihe River Basin (HUBEX). *Meteor Sci Technol*, (4): 33-38 (in Chinese)
- 张雁. 2000. 淮河流域能量与水分循环试验和研究(HUBEX)项目进展. *气象科技*, 28(1): 11-15. Zhang Y. 2000. Progress of energy and water cycle experiment over the Huaihe River Basin (HUBEX). *Meteor Sci Technol*, 28(1): 11-15 (in Chinese)
- 张雁, 丁一汇, 马强. 2001. 持续性梅雨锋暴雨的环流特征分析. *气候与环境研究*, 6(2): 161-167. Zhang Y, Ding Y H, Ma Q. 2001. Analysis of the atmospheric circulation in relation to persistent rain storm on the Meiyu front. *Climatic Environ Res*, 6(2): 161-167 (in Chinese)
- 张雁. 2005. 中日科学家共同探讨边界层大气和降水关系. *气象科技合作动态*, (6): 32-33. Zhang Y. 2005. Chinese and Japanese scientists discuss the relationship between boundary layer atmosphere and precipitation. *Meteor Sci Technol Coop*, (6): 32-33 (in Chinese)
- 周小刚, 罗云峰. 2014. “九五”基金重大项目“淮河流域能量与水分循环试验和研究”介绍与回顾. *中国科学基金*, 18(4): 226-228. Zhou X G, Luo Y F. 2014. Introduction on the major project of "Huaihe River Basin energy and water cycle experiment". *Bull Natl Nat Sci Found China*, 18(4): 226-228 (in Chinese)
- 朱民, 魏鸣, 葛文忠. 1999. HUBEX-IOP 暴雨降水的中尺度数值模拟试验 // 赵柏林, 丁一汇. 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社, 96-101. Zhu M, Wei M, Ge W Z. 1999. Mesoscale numerical simulation experiment of rainstorm precipitation during HUBEX-IOP // Zhao B L, Ding Y H. *Huaihe River Basin Energy and Water Cycle Experiment (1)*. Beijing: China Meteorological Press, 96-101 (in Chinese)
- 朱治林, 孙晓敏, 张仁华. 2001. 淮河流域典型地面水热通量的观测分析. *气候与环境研究*, 6(2): 214-220. Zhu Z L, Sun X M, Zhang R H. 2001. The observation and analysis of sensible and latent heat fluxes of typical surface in Huaihe River Basin. *Climatic Environ Res*, 6(2): 214-220 (in Chinese)
- 朱宗申, 马清云, 郝民等. 2002. HUBEX 区域资料同化系统. *应用气象学报*, 13(2): 170-178. Zhu Z S, Ma Q Y, Hao M, et al. 2002. Regional data assimilation system of Huaihe Basin experiment (HUBEX). *J Appl Meteor Sci*, 13(2): 170-178 (in Chinese)
- Chahine M T. 1992. GEWEX: The global energy and water cycle experiment. *Eos, Trans Am Geophys Union*, 73(2): 9-14
- Coughlan M, Avissar R. 1996. The Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Continental-Scale International Project (GCIP): An overview. *J Geophys Res*, 101(D3): 7139-7147
- Ding Y H, Zhang Y, Ma Q, et al. 2001. Analysis of the large-scale circulation features and synoptic systems in East Asia during the intensive observation period of GAME/HUBEX. *J Meteor Soc Japan*, 79(1B): 277-300
- Ding Y H, Liu Y Y, Zhang L, et al. 2011. The Meiyu weather system in East Asia: Build-up, maintenance and structures // Change C P, Ding Y H, Lau N C, et al. *The Global Monsoon System-Research and Forecast*. 2nd Edition. Singapo: World Scientific, 205-221
- Guo X, Dang R Q, Ge W Z. 2000. The use of radar data in the numerical simulation of heavy rainfalls in the Changjiang-Huaihe River Basin. *J Trop Meteor*, 6(2): 212-218
- Lawford R G. 1999. A midterm report on the GEWEX Continental-Scale International Project (GCIP). *J Geophys Res*, 104(D16): 19279-19292
- Lawford R G, Nobre C A. 1999. Contributions of LBA and GCIP to the world climate research program // Proceedings of the Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Santiago, Chile: AMS
- Yasunari T. 1994. Gewex-related Asian monsoon experiment (GAME). *Adv Space Res*, 14(1): 161-165