

区域能量与水循环——淮河流域综合气候观象台观测网设计思考

李柏¹ 赵倩^{2,3} 黄勇^{2,3} 卢燕宇^{2,3}

(1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

2 寿县国家气候观象台 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;

3 安徽省气象科学研究所 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 淮河流域是典型的气候过渡带, 研究淮河流域的水与能量循环具有重要价值。回顾了全球能量与水循环的概况, 设计了水循环各主要环节的观测方案, 同时在借鉴美国全球降水测量计划(GPM)和美国“奥林匹克山试验(OLYMPEX)”项目的基础上, 提出我国淮河流域的水与能量循环试验的目标和具体的实施方案, 为未来淮河流域气候综合观象台观测网的建立提供新的思路。

关键词: 淮河流域, 水与能量循环, 观测方案

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.011

Regional Energy and Water Cycle-Thinking on the Design of Comprehensive Climate Observatory in Huaihe River Basin

Li Bai¹, Zhao Qian^{2,3}, Huang Yong^{2,3}, Lu Yanyu^{2,3}

(1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 Shouxian National Climatology Observatory/ Huaihe River Basin Typical Agro-Ecosystems Meteorology Field Experiment Station of CMA, Shouxian 232200 3 Anhui Institute of Meteorological Sciences/ Key Laboratory of

Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031)

Abstract: The Huaihe River Basin is a typical climate transition region. It is rather important to study the water and energy cycle in this zone. This paper not only reviews the general situation of global energy and water cycle, but also designs the observation scheme of each water cycle's link. At the same time, on the basis of American global precipitation measurement (GPM) and Olympic Mountain experiment (OLYMPEX), this article presents the goal and specific implementation plan of the water and energy cycle experiment in Huaihe River Basin. Which provides a new train of thought for the establishment of the climate observatory observation network for the future in the Huaihe River Basin.

Keywords: Huaihe River Basin, water and energy cycles, observation scheme

0 引言

淮河流域地处我国南北气候过渡带, 受东亚季风影响, 近年来旱涝灾害频发, 直接威胁人民的生命财产安全, 制约社会和经济的发展。在极端灾害天气中, 水与能量的循环扮演着重要的角色, 其不仅维持着地球上各水体之间的动态平衡, 使淡水资源不断更新, 而且促进自然界物质的运动和能量交换, 对生态、气候等产生深刻的影响。因此, 开展水与能量循

环综合观测, 对研究水与能量循环规律, 揭示旱涝的形成机制, 提高极端天气的预测水平具有重要作用。

淮河流域属于地球水与能量循环的一个组成部分。地球上的水与能量循环, 使得水分子不断地从一个地方移动到另一个地方, 并对天气和气候产生很重要的影响。水循环主要由太阳能驱动, 这种太阳能可以通过蒸发海洋、湖泊、河流甚至土壤中的水分来驱动循环。其他水分通过蒸腾作用从植物进入大气。当液态水蒸发或蒸腾时, 它形成水蒸气和云, 水滴最终获得足够的质量以降水的形式落回地球。然后降水变成径流或地下水, 并通过不同的时间尺度回到地表水库。对于整个地球而言, 水循环本质上是一个

收稿日期: 2020年9月4日; 修回日期: 2020年10月4日

第一作者: 李柏(1959—), Email: libai@cma.gov.cn

通信作者: 赵倩(1988—), Email: qianzhao8@163.com

封闭的系统，这意味着现在水圈中水的体积和地球系统中一直存在的水的体积是相同的。但是，对于区域性的水与能量循环，却存在年际的变化与不平衡。而淮河流域的水与能量循环的变化与不平衡尤为突出。

水与能量循环作为科学问题，它贯穿于气象综合观测各个领域，水循环与能量循环是相伴而行，在水循环的各个环节中，都伴有能量的循环与转换；例如：在蒸发过程中，大量的热能被吸收，使得水温上升，水分子变得更加活跃，脱离水体，形成水蒸气；再有当水汽输送到某地被抬升，凝结形成云，水蒸气中的热能被大量释放，使得局地大气被加热，并导致大气密度变化；因此，在水循环的各个环节，水通过自身相态的改变，促成了能量的转换与循环。这一相互促进与相互影响的过程，衍生出了大气千姿百态，气象万千的景象，同时，也催生出了各种天气系统发展与演变。因此，现代化的气象综合观测系统必须把水与能量循环精细化过程充分揭示出来，才能构建出更加符合实际的数值模式，从而做出准确的气象预测与预报。

近年来，利用先进的探测设备和技术手段，国内外开展了不少水与能量循环试验研究。20世纪90年代，中日科学家联合在淮河流域开展了被誉为20世纪末我国大气科学领域四个科学试验之一的“淮河流域能量与水循环试验”（Huaihe River Basin Experiment-HUBEX, 1998—2000年）。这是一次大规模的气象与水文联合观测试验，数百名中日气象与水文科学家和工程师，利用水文—气象站、天气雷达、气象卫星以及许多先进的水文气象观测仪器设备，开展了连续的观测试验，进一步了解东亚季风区（主要是梅雨区）中尺度降水系统的能量与水循环过程及其与陆面过程的相互作用，并建立了区域气候水文模式，提高了延伸天气、气候预报时效以及降水的预报精度，产生了显著的社会效益与经济效益^[1-11]。2015年11月—2016年2月，GPM（Global Precipitation Measurement）试验和奥林匹克山试验（OLYMPEX, Olympic Mountain Experiment）相继开展，取得了一系列研究成果^[12-13]。其中GPM试验是美国国家航空航天局和日本宇宙航空研究开发机构联合展开的一项基于全球水与能量循环的外场观测试验，试验中利用GPM主动式和被动式遥感技术，测量受降水影响的微波辐射和瞬时降水率，量化区域和全球水循环过程，实现从太空进行降水的测量，提高对降水系统、水循环变化和淡水可用性的认识，同时改进天气预报、气候模型、水文模型，提高洪水、干旱、山体滑坡和飓

风等高影响自然灾害事件的预测能力。“奥林匹克山试验（OLYMPEX）”是全球水与能量循环背景下的试验，由美国国家航空航天局牵头在华盛顿州的奥林匹克半岛开展，该项试验的核心任务是评估全球降水测量任务核心观测站（GPM）的卫星测量数据，并对上述数据加以验证。为了确保卫星对降雨和降雪的测量在太空中是准确的，OLYMPEX试验构建了空天地一体化协同观测和垂直结构观测网络，其中高时空密度观测网、协同观测、高精度垂直结构观测是十分必要的。OLYMPEX试验中建立了地面仪器，包括雨量计、天气雷达和气球发射场，用以监测即将到来的风暴，同时试验中从三架穿越雨云的飞机、GPM核心观测站和其他降雨观测卫星上收集数据。科学家们在风暴过境时从地面站进行测量，而在头顶上飞行的飞机则携带着模拟卫星传感器的仪器，这使人们能够准确地将地面上对真实情况的最佳估计与从卫星上面观测到的降水进行比较。科学家们通过详细的地面观测与飞机上模拟卫星观测，提高了对大气中导致降水的过程的理解。

着眼全球，如何以更高的站位开展更深入的淮河流域能量与水循环科学试验，成为一个亟待思考的问题。OLYMPEX试验为未来瞄准淮河流域能量与水循环的科学问题来设计综合观测体系提供了很好的思路和借鉴，本文将从地球系统水与能量循环概况、流域或区域水循环各阶段的观测设计思考、淮河流域气候综合观象台观测网设计、总结和展望四个方面展开阐述。

1 水与能量循环概况

地球系统由大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈、岩石圈等圈层组成，这五大圈层均和能量与水循环息息相关，同时大气的能量和水分的运动与地球表面的各种过程密切相关，地表与大气间作用的过程实质上是能量、动量和质量的互相交换过程^[14-15]。辐射为地气系统能量交换和物质交换提供能源，辐射平衡直接影响地气系统能量交换和物质交换，而地表特征和下垫面物理性质在时空分布上的差异，对地气系统能量、动量和质量的分布有极大的影响^[16-17]。

水循环是全球能量与水的平衡和交换过程，能量与水循环的重点是水的相态变化和循环过程。地球的总储水量约13.8亿 km^3 ，平均每年只有57.7万 km^3 的水参与水文循环，按此速度，地球上全部的水量都参与循环一次或者说全部水量更新一次，大约需要2400年（表1）。全球超过97%的水资源储存在海洋之中（表2），在全球水循环过程中，海洋发挥着重要的作用，不考

考虑海洋及其对天气的影响，就无法深入了解所经历的天气过程，以及天气对它的影响。此外，海洋吸收、储存和释放热量到大气中的能力是巨大的，事实上，仅仅海洋表面的3 m就包含了比我们整个大气层还多的热量，影响全球的厄尔尼诺等重大气候事件就是由海洋温度异常变化引起的。

表1 地球上各种水体中水的更新时间^[18]

Table 1 The turnover time in various bodies of water on earth

水体类别	更新时间/a	水体类别	更新时间
极地冰川、长年积雪	约10000	土壤水	1 a
世界大洋	2500	河流水	16 d
高山冰川	1600	大气水	8 d
深层地下水	1400	生物水	12 h
湖泊水	17	全球	2400 a
沼泽水	5		

表2 地球水资源分布概况^[19]

Table 2 Overview of the distribution of water resources on earth

全球水分布估计	体积/1000 km ³	占总水量的比重	占淡水的比重
海洋和海湾	1338000	96.5	/
冰盖、冰川、长年积雪	24064	1.74	68.7
地下水	23400	1.7	/
淡水	(10530)	(0.76)	30.1
盐水	(12870)	(0.74)	/
土壤湿度	16.5	0.001	0.05
底冰和永久冻土	300	0.022	0.86
湖泊	176.4	0.013	/
淡水湖	(91.0)	(0.007)	0.26
盐水湖	(85.4)	(0.006)	/
大气	12.9	0.001	0.04
沼泽	11.47	0.0008	0.03
河流	2.12	0.0002	0.006
生物水	1.12	0.0001	0.003
合计	1385984	100.0	100.0

了解水与能量循环需要从以下几个方面进行，即水循环的基本状况、能量转换与循环的基本状况、水循环对地球能量收支平衡及其他圈层的影响。

1.1 水循环的基本状况

水循环是指地球上的水在太阳辐射和地心引力等作用下，以蒸发、降水和径流等方式进行周而复始的运动过程，太阳辐射是水循环的原动力，也是整个地球一大气系统的外部能源，能量守恒定律是水循环过程所遵循的一个基本规律。水循环的基本过程包括蒸发、植物蒸腾、升华、凝结、传输、降水、地表径流、渗透、地下水流动、植物吸收等10个环节

(图1)。

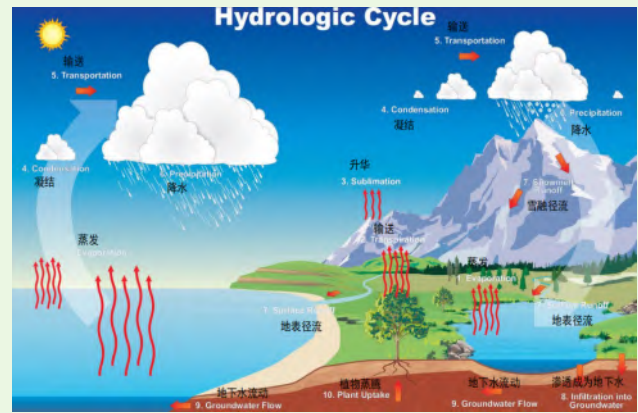


图1 全球水循环示意图^①

Fig. 1 Schematic of the global water cycle

水循环的产生有内因和外因两种。内因包括水的“三态”变化，即在常温条件下，水的气态、液态、固态可以相互转化，这使得水分循环过程的转移、交换成为可能。外因包括太阳辐射和地心引力。太阳辐射的热力作用为水的“三态”转化提供了条件，太阳辐射分布的不均匀性和海陆的热力性质的差异，造成空气的流动，为水汽的移动创造了条件。地心引力（重力）促成降水，并使水从高处向低处流动，从陆地到海洋，从而实现了水分循环。各种天气现象如云、雨、雪、霜及台风暴雨等，本身就是水循环的产物，没有水循环就不存在这类天气现象。

水循环涉及整个水圈，并深入到大气圈、冰冻圈、岩石圈及生物圈，全球水循环是一个闭合系统，但局部水循环是开放的系统，地球上的水分在交替循环过程中，溶解且携带某些物质运动。此外，水循环是物质与能量的传输、储存和转换过程，存在于每个环节，且遵守质能守恒定律，即热能转化为势能，势能转化为动能。

水循环有不同的分类方法，以海陆为标准可以分为海陆大循环、海洋小循环和陆地小循环。海陆大循环是指海洋表面蒸发的水汽，被气流带到大陆上空，在适当的条件下，以降水的形式降落到地面后，其中一部分蒸发到空中，另一部分经过地表和地下径流又流到海洋，这种海陆间的水循环又称大循环；海陆大循环使得陆地上的水不断得到补充、更新，使水资源得以再生，维护了全球水量的平衡。海洋小循环就是海面上的水分蒸发成水汽，进入大气后在海洋上空凝结，形成降水，又降落到海面的过程；海洋小循环是携带水量最大的水循环，是海陆间大循环的近10倍。

① www.srh.noaa.gov/jetstream.

陆地小循环包括外流区小循环和内流区小循环，是指陆面水分的一部分或者全部通过陆面、水面蒸发和植物蒸腾形成水汽，在高空冷凝形成降水，仍落到陆地上，从而完成的水循环过程，陆地小循环存在局地或区域的不平衡性，影响着全球的气候和生态并塑造了地表形态。

水循环从大到小的尺度可以分为全球水文循环、流域或区域水文循环、水—土—植系统水循环，其中淮河流域水循环属于流域或区域水循环。

1.2 能量转换与循环的基本状况

地球大气水循环的各个环节中，均伴有能量的转换与循环，而辐射平衡直接影响地气系统能量交换和物质交换。太阳辐射是地气系统中一切物理过程和现象形成的基本能量来源，当太阳辐射穿过大气到

达地球表面时将产生一系列的能量再分配，且能量收支遵循能量守恒定律。如若将到达大气上界的太阳辐射视为100个单位，大气、云和地表对其均存在反射和吸收，在太阳辐射到达地面的过程中，首先被大气反射6个单位，吸收16个单位；在遇到云层时，被云层反射20个单位，吸收3个单位；最后太阳辐射到达地面，除去地表反射7个单位外，51个单位被地表吸收；在100个单位的太阳辐射中，70个单位被吸收，30个单位被反射回太空。在地表吸收的能量中，一部分通过水汽通过潜热传递给大气和云、一部分被对流和上升气流携带、一部分反射回大气被吸收，地表、大气和云层吸收的太阳辐射的能量又通过大气和云层反射回太空或通过地面直接反射回太空，使得大气的能量收支达到平衡。

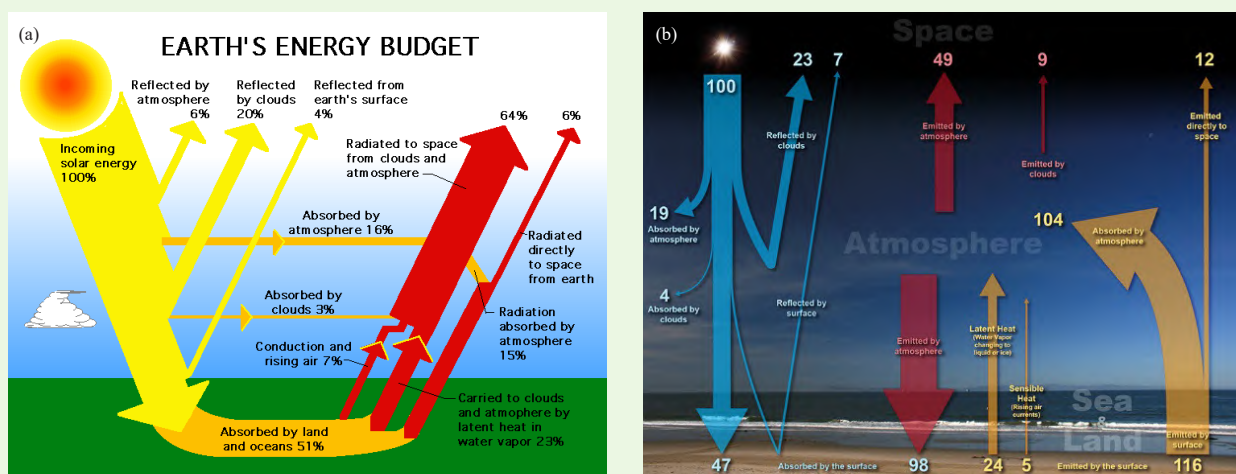


图2 地球能量收支示意图^①
Fig. 2 Diagram of the earth's energy budget

云是全球和区域能量收支最重要的调节者，一方面云对来自地球表面的热辐射有很好的吸收作用，同时云也放出热辐射构成温室气体；另一方面云又能有效的反射太阳短波辐射，这两种相反的作用使云在地球的辐射平衡中成为既有效又复杂的调节因子。但不同地区比如平原和流域，由于云的状况不同，能量收支亦存在差异。王可丽^[20]研究表明青藏高原地区的地—气相互作用非常明显，且云状况与平原地区存在明显差异，地—气系统获得的净辐射及由辐射引起的不同加热分布都强烈地受云的影响；吴宝俊^[21]指出从能量的观点看，伴有暴雨的中尺度云团的发展过程，是一次能量的释放过程，当能量释放后必定通过垂直输送和潜热释放对减少了的能量进行补充，从而使云团维持较长时间。因此云通过传输热量和水汽，反射

和吸收太阳辐射，导致能量转换与循环存在局地与区域的不平衡。

下垫面是大气主要的热源和水汽源，是影响气候的主要因素之一。由于低层大气几乎不能吸收太阳辐射，而能强烈吸收地面辐射，地面辐射是其主要能量来源，因此下垫面会以潜热输送、湍流输送等方式影响局地或区域能量收支。

凝结潜热释放是降水天气系统与环境大气间进行热量、动量交换的主要渠道。云和降水粒子的形成、增长、演变伴随产生的相变潜热，作为一种热源或热汇，会对云和降水的发展、演变产生影响。陶玥等^[22]研究表明对流云团中5000 m以上微物理过程起加热作用，以下起冷却作用，不同物理过程潜热加热的云层高度不同，高层起加热作用的主要是水汽凝结、云冰

① www.srh.noaa.gov/jetstream.

初生和雪凝华增长、霰撞冻云水过程，中层起加热/冷却作用的主要是水汽凝结、霰/雹融化过程，低层雨水的蒸发过程起冷却作用。潜热的变化与降水强度的演变相一致，在降水的不同阶段，潜热的峰值高度随降雨的增强有上传的趋势。增加云系暖区潜热，可促进低层气旋性环流的形成，增强低层动力场的辐合，动力场的加强又直接影响水汽的输送，间接促进对流云系的发展。

1.3 水循环对地球能量收支平衡及其他圈层的影响

水圈中的水，通过周流不息的循环运动，积极参与了圈层之间界面活动，并且深入四大圈层内部，将它们耦合在一起。

水循环，它上达15 km的高空，成为大气圈的有机组成部分，担当了大气循环过程的主角，深入地表以下1~3 km，积极参与岩石圈中化学元素的迁移过程，成为地质大循环的主要动力因素。同时水作为生命活动的源泉，生物有机体的组成部分，它全面参与了生物大循环，成为沟通无机界和有机界联系的纽带。同时，水是构成冰冻圈的主要成分，通过水的相态变化形成水循环。

众所周知，不同纬度的太阳辐射收支存在着不平衡，中低纬度地区太阳辐射的净收入大于净支出，高纬度则相反。而水循环使得地表辐射能重新分配，不同纬度热量收支不平衡矛盾得到缓解。如果没有洋流来调节高低纬度之间的这种热量分配的不均状态，那么赤道附近地区的温度要比现今增加10℃以上，两极地区则要降低20℃。

总体来说，全球水量处在平衡状态。所谓水量平衡是指在任意时段内研究区的输入和输出水量之差等于该区域内的储水量的变化值，即水在循环过程中，从总体上说收支平衡，服从质量守恒定律。水量平衡研究的对象可以是全球、某区域（流域）或某单元的水体（如河段、湖泊、沼泽、海洋等）。研究的时段可以是分钟、小时、日、月、年，或更长的尺度。

通过对水量平衡的研究，可以定量揭示水循环过程与全球地理环境、自然生态系统以及人类活动之间的相互联系、相互制约的关系，探究水循环系统内在结构和运行机制，同时水量平衡研究是水资源现状评价与供需预测研究工作的核心，可以为流域规划提供基本设计参数。

水量平衡方程通式： $I - Q = \frac{ds}{dt}$ ，式中： I 为收入项， Q 为支出项，可视具体情况进一步细分，其简繁程度与所研究的对象以及时段长短有关。对于多年平均来说， ΔS 接近于零，可忽略不计；

但对于短时段水量平衡方程而言，蓄水变化量 ΔS 不可忽略。

对于陆地而言，平衡方程有以下几种：

1) 区域水量平衡方程，

$$P_{\text{陆}} + R'_{\text{地表}} + R'_{\text{地下}} - R_{\text{地表}} - R_{\text{地下}} - E - T = \Delta S,$$

2) 闭合外流流域平衡方程，

$$P_{\text{陆}} - R_{\text{地表}} - R_{\text{地下}} - E - T = \Delta S,$$

3) 闭合内流流域平衡方程， $P_{\text{陆}} - E - T = \Delta S$ ，

4) 多年平均， $\bar{P}_{\text{陆}} - \bar{R} = E_{\text{陆}}$ ，

式中： $P_{\text{陆}}$ 为陆地降水， $R'_{\text{地表}}$ 为流入的地表径流， $R'_{\text{地下}}$ 为流入的地下径流， $R_{\text{地表}}$ 为流出的地表径流， $R_{\text{地下}}$ 为流出的地下径流， E 为蒸发， T 为植物蒸腾。

对于海洋而言，平衡方程有以下几种：

1) 海洋水量平衡方程， $P_{\text{海}} + R - E_{\text{海}} = \Delta S_{\text{海}}$ ，

2) 多年平均， $\bar{P}_{\text{海}} + \bar{R} = E_{\text{海}}$ ，

式中： $P_{\text{海}}$ 为海洋降水， R 为地表径流， $E_{\text{海}}$ 为海洋蒸发。

对全球多年平均而言，水量平衡方程为：

$$\bar{P}_{\text{全球}} = \bar{E}_{\text{全球}}。$$

2 流域或区域水循环各阶段的观测设计思考

如果要深入了解水循环过程和机制，实现对水循环过程及其各分量的定量描述，则需要了解水循环各个阶段的关键影响因子和观测方法。水循环是地球一大气系统中水的连续循环，其核心是水从地面到大气再回到地面的运动。在区域大气中的水文循环所涉及的许多过程中，最重要的是蒸发、蒸腾、输送、凝结、降水、径流（包括流入和流出）等环节，通过寻找6个环节影响因子并加以观测，并建立局地立体大气柱的综合观测网，可实现对水循环过程的定量监测和评估。

区域或流域水循环过程，与地球整体循环过程是基本一致的，但是在区域水循环过程中与地球系统水循环最大差异就是区域水循环的不平衡，不守恒问题。主要表现在区域水循环的各个环节上。如：区域蒸发的年际差异和季节差异，区域云量的年际差异和季节差异，区域降水的年际变化与季节变化等。

伴随水循环各个环节的同时，能量转换与循环也会发生相应的变化，多云的季节和年份，太阳辐射对下垫面的辐射能量、地表温度影响不同；夏季降水系统与冬季降水系统中潜热释放差异对系统对流发展的影响等（图3）。因此，通过综合气候观象台的观测网设计，揭示出这些循环过程在区域的变化及变化规律，并逐步量化各个循环过程，是综合气候观象台观测网设计目标。

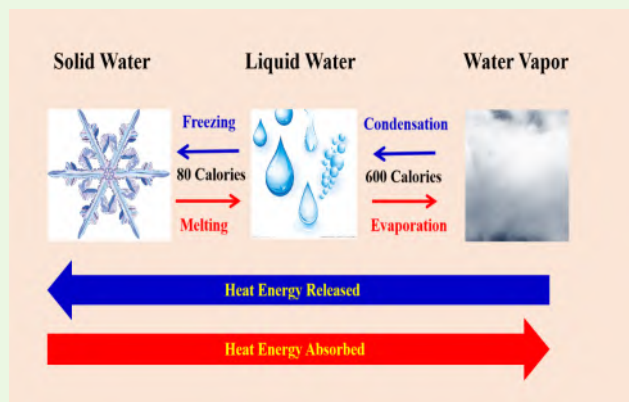


图3 相态变化与潜热释放示意图

Fig. 3 Schematic diagram of phase change and latent heat release

2.1 蒸发、蒸腾及其观测设计

蒸发是一种物质从液体变为气体的状态变化。蒸发发生需要的能量可以来自任何来源，比如太阳、大气、地球或地球上的物体（人类）。在水循环的蒸发环节，太阳加热海洋、湖泊、河流和潮湿土壤中的液态水，通过蒸发过程把它变成气体，上升到大气中。

蒸腾是植物通过气孔蒸发水分的过程。气孔是在叶片下方发现的小开口，与维管植物组织相连。在大多数植物中，蒸腾是一个被动的过程，主要受大气湿度和土壤含水量的控制，通过植物排出的水分只有1%用于植物的生长过程，剩下的99%被排放到大气中。

地面或植被中的水分受太阳辐射的影响会变为水蒸气到达大气中，在不同的下垫面和地貌情况下，比如草地和城市，受比热容等因素的影响，蒸发速率具有较大差异，水汽脱离水体或植物在运动过程中受到重力加速度的影响，在一般的计算中，我们将重力加速度设定为某一固定值，而实际上不同地区重力加速度存在差异，需要更精细的测量。从前面的分析中可以看出影响蒸发与蒸腾环节的物理因素有太阳辐射（总辐射、短波辐射、长波辐射、净辐射）、下垫面特征参数、地形地貌特征、重力场分布特征等。目前，前三项观测已经较为完备成熟，开展重力场的观测是未来一个重要方向。

2.2 输送及其观测设计

输送是水汽和能量的水平输送与垂直输送；影响水汽和热量输送因素有风场的水平辐散辐合、区域的水汽通量（水平通量与垂直通量）、动量和热等能量通量等。开展通量观测可以帮助了解水循环的输送。

2.3 凝结及其观测设计

凝结是大气中的水蒸气凝华转为液态的过程，以

云或露的形式出现。凝结不是一个特定温度的问题，而是两个温度之间的差异，即空气温度和露点温度，当空气温度和露点温度相等时，常出现雾天。凝结是蒸发的反面。由于水蒸气的能量比液态水高，所以当凝结发生时，多余的能量以热能的形式释放出来，这种热量的释放有助于飓风的形成。当水以气体的形式在大气中上升时，它开始冷却并再次变成液体，这个过程叫做冷凝，当大量的水蒸气凝结时，就会形成云。

水汽凝结成水滴，冻结成冰晶，过程中存在大量潜热释放。总的来说，云粒子是在吸湿性粒子上的凝结，该吸湿性粒子指的是一种特殊的水溶性气溶胶。云滴因凝结而增长，云滴的大小一般在 $5\sim 25\ \mu\text{m}$ ，同时云滴的末速度很小。

凝结环节的观测就是对云的宏观和微观物理量进行观测，目前对云的观测主要围绕云的宏观物理量（包括云底高度、云顶高度、云的 $0\ ^\circ\text{C}$ 、 $-20\ ^\circ\text{C}$ 、 $-40\ ^\circ\text{C}$ 层高度）、云的微观物理量（包括云滴大小，云滴谱分布特征，云的冰晶结构特征）、云滴和冰晶的速度谱特征、云内上升运动特征、云滴和冰晶下落末速度。目前在深对流中，液态水滴转固态冰晶的观测尚为薄弱，需要在将来进一步发展。如果凝结环节的观测发展成熟，未来可以实现对局地热对流的量化处理。

2.4 降水及其观测设计

降水是由于云中微小的凝结颗粒过大，经过碰撞和凝聚，使得上升的空气无法支撑，从而落到地面上，通常以雨、雹、雪或雨夹雪的形式出现。降水是我们地球上获取淡水的主要方式，平均而言，全世界每年在海洋和陆地上接收到大约 $980\ \text{mm}$ 的降水。降水又分为液态降水和固态降水，液态降水包括暴雨、小雨、毛毛雨，固态降水包括雪、冰雹、霰。

目前基于降水的观测较为成熟，主要围绕降水过程的定量测量，包括雨强和过程总量的测量、区域和流域的面雨量测量、雨滴大小和雨滴谱分布特征测量、降雪的测量和冰雹的测量。

2.5 径流及其观测设计

当雨水在土地上时，一些水被吸收到地下，形成了称为地下水的水囊，大部分地下水最终会回到海洋，其他降水则直接流入小溪或河流，在河流、小溪和海洋中聚集的水称为径流。径流发生时，一般伴随着过多的降水与饱和的地面，河流和湖泊是径流的结果。径流中的水有三种去向，即蒸发、流出入海、下渗，当这些径流蒸发到大气中，便开始了水文循

环,如果径流水只流入湖泊(没有出口),那么蒸发是水返回大气的唯一途径,当水蒸发时,会留下杂质或盐,久而久之淡水湖变咸。有些水渗进土壤和地下水,形成水囊,被植物吸收以进行蒸腾作用,进行下一步的循环。

对区域和流域水文物理量的测量主要有确定封闭的区域性流域、各控制节点的流量、区域面雨量、流域和区域的总的流量(包括流入和流出)等。

3 淮河流域气候综合观象台观测网设计

从前面我们了解到水循环的机理、各个阶段的观测设计以及国外先进的水循环外场试验,下面要探讨淮河流域重要的科学问题之一——该区域水与能量如何循环以及各环节分量如何观测以及定量描述,从而实现区域水和能量循环的实时、定量、全貌的监测评估。

3.1 淮河流域特征

秦岭—淮河一线是中国的南北分界线,这里说的南北之分,不是文化的概念,而是指自然地理上的南北之分,确切地说,是亚热带(南方)与暖温带(北方)之分。

淮河流域地处北亚热带向暖温带过渡区,属大陆性季风气候,大气系统复杂多变,降雨时空分布不均,极易产生水旱灾害。其特点是冬春干旱少雨,夏秋闷热多雨,冷暖和旱涝转变急剧。年平均气温在 $11\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$,由北向南,由沿海向内陆递增,最高月平均气温为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,出现在7月;最低月平均气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,出现在1月;极端最高气温可达 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,极端最低气温可达 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。淮河流域多年平均降雨量为 911 mm ,总的趋势是南部大、北部小、山区大、平原小、沿海大、内陆小。淮南大别山区淮河上游年降雨量最大,可达 1500 mm 以上、而西北部与黄河相邻地区则不到 680 mm 。东北部沂蒙山区虽处于本流域最北处,由于地形及邻海缘故,年降雨量可达 $850\sim 900\text{ mm}$ 。流域内5月15日—9月30日为汛期,平均降雨量达 578 mm ,占全部年降雨量的63%。降雨量年际变化大,1954、1956年分别为 1185 mm 和 1181 mm ,1966、1978年仅 578 mm 和 600 mm 。

淮河流域水循环属于流域或区域水循环,水循环过程包括蒸发—蒸腾—输送—凝结—降水—径流。如前所述,水循环与能量循环紧密交织、密切相连,其重要一环就是潜热。固态变为液态或液态变为气态所需要的能量,以及气体变为液体或液体变为固体时所释放的能量均为潜热。总地说来,能量通过三个过程离开地球表面:蒸发或凝结(或潜在加热和冷却)、

对流和热红外辐射的发射,在这三个过程中,离开地球表面能量的25%是通过蒸发和凝结产生的,5%通过对流离开地表。其中对流是由于温度不同的各个部分流体之间发生相对运动,互相掺和而传递热能,包括自然对流换热和受迫对流换热。对于淮河流域这一气候地理分界区,其能量与水循环特征具有典型的代表性,同时其能量与水循环过程对上下游和周边地区也具有显著的影响,如何给出该区域能量和水循环过程各环节的定量描述是开展淮河流域综合观测的重要任务。

3.2 淮河流域综合观测网设计科学目标定位

3.2.1 目标定位

淮河流域综合观测网的定位是在我国季风气候背景下,在淮河流域梅雨锋暴雨期,构建能够实现水与能量循环的综合观测体系,给出我国典型降水天气系统—梅雨锋暴雨期间,淮河流域地球—大气系统中的水在蒸发、蒸腾、输送、凝结、降水和径流等多环节过程中连续循环的模型。并通过10年以上的连续观测,实现对淮河流域水与能量循环各个环节的量化,逐步建立起淮河流域的地表—大气水与能量循环的定量化模型。

总的来说,通过建立淮河流域从地面到平流层下部的立体气柱的综合观测,深入揭示淮河流域水与能量循环特征,并通过长期观测逐步建立起淮河流域水与能量循环各个环节(包括蒸发(蒸腾)、凝结(云)、降水(面雨量、雨量分布)、降水类型、主要流域及支流的径流)的定量化特征指标。

为实现上述目标,需逐步实现:

第一,淮河流域不同下垫面的蒸发与蒸腾(冠层)特征以及地表与大气辐射通量(长波辐射、短波辐射、净辐射)的感热通量、动量通量等特征;

第二,淮河流域主要降水系统云的结构及云分类;深入揭示造成淮河流域降水和暴雨过程的天气系统的云的构成及类型,并在此基础上进一步揭示其云粒子谱和降水粒子谱以及其相态特征及结构分布特征;

第三,淮河流域主要降水系统(重点是南海季风爆发引发的暴雨过程)的动力与热力结构特征,重点是揭示其垂直结构的精细化特征,为暴雨产生的形成机理研究奠定基础;

第四,建立不同类型降水的面雨量分布特征,结合气象、水文地面雨量观测网与流域水文观测网,逐步建立淮河流域定量化水文模型。

3.2.2 设计思路

为实现上述科学目标综合观测网应该包括以下组成部分：

1) 淮河流域水汽通量水平与垂直观测系统。水平观测主要通过周边业务探空系统、增设的遥感探空或全自动卫星导航探空系统和卫星（风云三号、风云四号）提供的水汽观测资料构建淮河流域水汽通量的观测网；此外，在淮河流域内逐步建立以高塔和依托区域内的高山地形的边界层水汽垂直通量观测网（图4）；

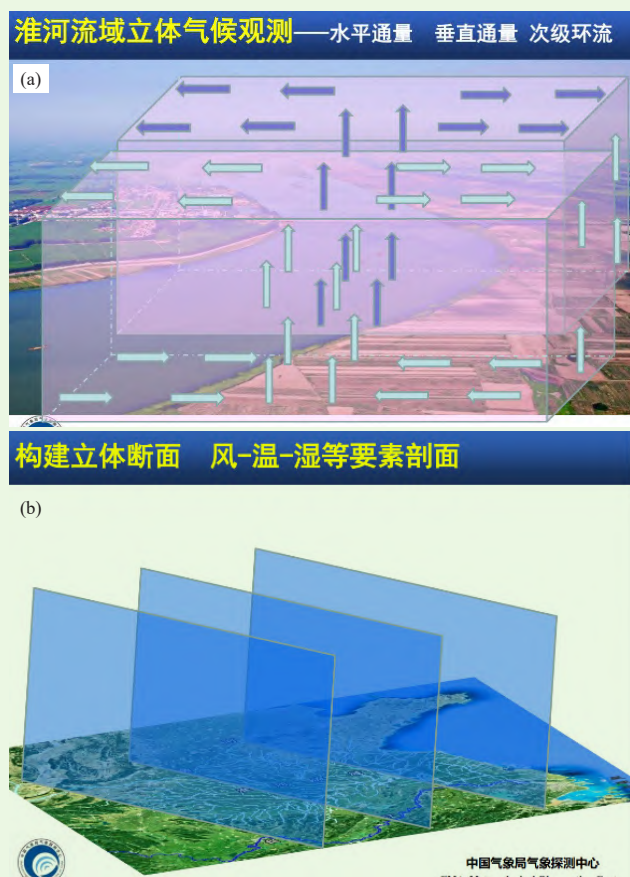


图4 淮河流域立体综合观测网

Fig. 4 Three-dimensional comprehensive observation network of Huaihe River Basin

2) 淮河流域云（凝结）过程观测网。建立区域Ka波段云雷达网，组成云（凝结）过程的观测网，形成对淮河流域云在不同阶段的连续演变观测，揭示不同阶段云微物理过程；

3) 淮河流域降水过程观测网。依托安徽、河南、江苏和山东业务天气雷达网，构建淮河流域区域级X波段双偏振雷达网，形成对淮河流域的降水过程连续追踪观测；建立淮河流域雷达与雨量计联合定量估测降水观测体系，形成对淮河流域的降水的量化高精度准确观测能力，同时建立起对淮河流域以及主

要流域的面雨量观测产品；揭示出淮河流域降水分布及演变特征（包括测雨雷达形成雷达降水气候特征）；

4) 淮河流域水文气象观测网。选取淮河流域2~3个封闭流域区，建立起从流域支流起点到淮河干流的径流观测网；

5) 淮河流域特色生态观测系统。针对淮河流域特色生态（农、林、下垫面植被等）等开展以生态、植物、物候、大气成分和（碳）通量等地观测。

在进行综合气候观象台观测网建设时应注重以下设计理念：

首先，是更加注重“全信息”探测，包括相态、风场、粒子谱、成分等；

其次，更加注重垂直结构及高分辨率探测，当分辨率足够高时，不同粒子、不同相态的统计特性才能显现出来；

第三，更加注重围绕大气水循环的全过程开展探测，包括大气辐射、水汽、云和降水的相互作用、陆面过程、水文过程等；

第四，更加注重协同综合观测，使得各类资料数据之间可比较、可验证、可溯源（图5）。

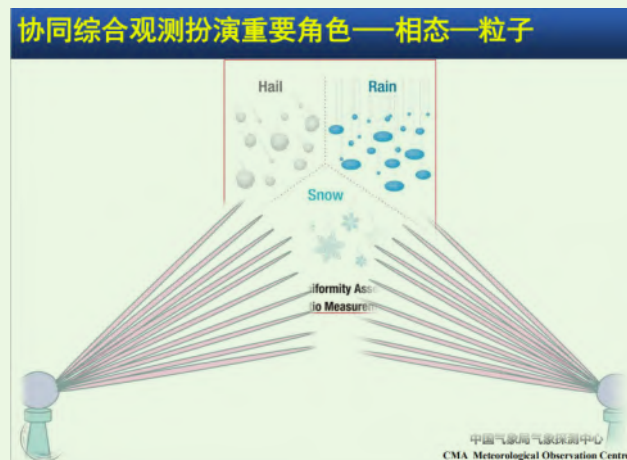


图5 协同观测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of collaborative observation

为做好淮河流域综合气候观象台观测网设计工作，还需要做好相关的前期基础工作。其中包括详细的近30年淮河流域气候特征，高分辨率的淮河流域下垫面特征用于卫星遥感和地面验证，淮河流域精细化的地形地貌资料（五万分之一）、淮河流域各支流和干流分布特征、淮河流域主要城镇分布，以及30年淮河流域主要梅雨锋暴雨过程分析资料。

4 总结和展望

无论是天气还是气候变化，降水过程发生具备三

个基本要素：水汽、凝结核和上升运动，其中水汽扮演了一个十分重要的角色。本文从地球系统水与能量循环概况入手，对流域或区域水循环各阶段的影响因子及其观测设计进行了分析，通过借鉴已有的相关科学计划和试验，提出淮河流域气候综合观象台观测网设计思考。

1) 水汽观测是综合气候观象台观测网建设的重要组成部分。由于水汽在整个气候与天气演变中扮演着重要角色，传统的反应区域或流域的气候变量大多是温度和降水，而水汽与水凝物观测是各要素中的重点；只有弄清楚一个区域或流域的水汽、云分布、降水分布等才能有效地把握该地区或流域的气候特征及变化。

2) 观测断面或剖面设计是气候观象台科学合理布局的关键。对于一个流域或区域来说，无论采用什么设备或观测技术等，其规模都是有限的，作为一个布局科学合理的综合观测网，应当是用有限规模实现最大化效益；因此，建立若干个合理的综合观测断面或剖面是实现科学合理建设综合气候观象台观测网的关键所在。通过这些断面观测网，不仅可以实现四维连续立体区域观测，同时能够对该区域进行多要素的通量的准确把握，实现区域或流域的总量、通量、净收支等变量的定量化。

3) 各要素与变量的垂直结构精细化观测设计是区域气候综合观象台设计的主攻方向。以往无论是传统的天气观测网，还是气候观测网都是以二维平面观测为基础的，随着遥感技术和高空气象观测平台技术的进步与发展，三维空间的立体观测已经成为现实，以德国林登伯格为代表的立体气候观象台就是一个著名的代表。

4) 星地一体化观测是未来综合气候观象台建设发展重要方向。随着科学技术进步与发展，地基、空基和天基一体化观测已经成为全球综合气象观测网发展的主要趋势。地基直接观测与空基遥感观测，在整个一体化观测体系中，将扮演一个极为重要的角色，那就是验证与校准。因此，综合气候观象台观测网设计应当考虑其星地、地空一体化设计理念，综合气候观象台应当成为我国风云系列气象卫星以及未来我国有人机和无人机空基观测的地面验证与校准系统的组成部分。

5) 作为流域气候综合观象台观测网设计，选择

封闭流域开展水循环观测，这对弄清楚该流域水循环年际变化、季节变化与收支平衡十分重要。

参考文献

- [1] Zhao B, Takeda T. Huaihe River Basin Experiment (GAME/HUBEX). Beijing: Beijing University Press, 1998.
- [2] 赵柏林, 丁一汇. 淮河流域能量与水份循环研究(一). 北京: 气象出版社, 1999: 214-220.
- [3] 周小刚, 罗云峰. “九五”基金重大项目“淮河流域能量与水份循环试验和研究”介绍与回顾. 中国科学基金, 2004, 4(8): 226-228.
- [4] 林朝晖, 杨小松, 郭裕福, 等. HUBEX试验期间淮河流域陆面过程特征的初步分析. 自然科学进展, 2001, 11(6): 588-594.
- [5] Hu G Q, Ding Y H. The energy budgets under different synoptic conditions over Huaihe River Basin during Hubex Field observation periods in 1999. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 16(3): 293-308.
- [6] 丁一汇, 胡国权. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究. 气象学报, 2003, 61(2): 129-145.
- [7] Yao Z Y, Xu C H, Yuan J, et al. Estimations of precipitable water and its characteristics during the HUBEX/IOP 1998. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(2): 219-226, doi: 10.1007/s00376-003-0007-6.
- [8] 胡雯, 王东勇, 张苏, 等. 淮河流域旱涝易发区农田的陆气相互作用——通量、能量交换和水汽输送的季节变化特征. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 92-100.
- [9] Fujiyoshi Y, Ding Y H. Final Report of GAME/HUBEX. GAME/HUBEX Project Office, 2006.
- [10] Shusse Y, Tsuboki K. Dimension characteristics and precipitation efficiency of cumulonimbus clouds in the region far south from the Meiyu front over the Eastern Asian continent. Monthly Weather Review, 2006, 134(7): 1942-1953.
- [11] Chen C, Li D, Gao Z Q, et al. Seasonal and Interannual Variations of Carbon Exchange over a Rice-Wheat Rotation System on the North China Plain. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(10): 1365-1380.
- [12] Prakash S, Mitra A K, Aghakouchak A, et al. A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region. Journal of Hydrology, 2016: 865-876.
- [13] Mcmurdie L. OLYMPEX: A Global Precipitation Mission (GPM) Ground Validation Campaign on the Olympic Peninsula in the Pacific Northwest. AGU Fall Meeting Abstracts, 2014.
- [14] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水能量平衡研究进展. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259.
- [15] Dickinson R E. Land processes in climate models. Remote Sensing Environment, 1995, 55(1): 27-38.
- [16] 张强, 卫国安, 黄荣辉. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数. 中国科学(地球科学), 2001, 31(9): 1-10.
- [17] 吴艾笙, 钟强. 黑河实验区若干下垫面总辐射、地表反射率与太阳高度角的关系. 高原气象, 1993, 12(2): 147-155.
- [18] PNUMA. UNEP environmental data report 1993-94. Estatísticas Ambientais, 1993.
- [19] Gleick P H. Water resources// Schneider S H. Encyclopedia of Climate and Weather. New York: Oxford University Press, 1996, 2: 817-823.
- [20] 王可丽. 青藏高原地区云对地表净辐射的影响. 高原气象, 1996, 15(3): 269-275.
- [21] 吴宝俊. 一次中尺度云团发展时的湿有效能量收支分析. 高原气象, 1995, 14(4): 476-485.
- [22] 陶玥, 齐彦斌, 洪延超. 华北一次暴雨过程中潜热对中尺度系统和降水影响的数值研究. 气象学报, 2012, 70(1): 51-64.