

A Review on the Advances in Catchment Hydrological Experiments under Changing Environment

Xiaole Han¹, Jintao Liu^{1,2}, Wenping Zhang¹

¹College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing

²State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing

Email: hanxiaole90@163.com, jtliu@hhu.edu.cn

Received: Apr. 4th, 2014; revised: Apr. 9th, 2014; accepted: Apr. 17th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper discussed the development of hydrological experiment under changing environment. Firstly, through reviewing the development history of hydrological experiment, we summarized the development history of hydrological experiment from the single hydrological element observations to systematic study of the hydrological experiment, then to the synthesized experiment plan (e.g. CZOs). Based on these, we described the present state of catchment hydrological experiments in China. It is shown that hydrological experiments have deficiencies in standards, data-sharing, and the interdisciplinary researches in China. Under the changing environment, hydrological experiments have been unable to meet the need of social economy development. Thus this paper has discussed the trend of future. We argued that theoretical, interdisciplinary researches should be adopted by experimental observations, which should be more standardized and be one part of the international observation plans.

Keywords

Hydrological Experiment, Experimental Catchment, Changing Environment, Critical Zone Observatory

变化环境下流域水文实验的发展述评

韩小乐¹, 刘金涛^{1,2}, 张文平¹

作者简介: 韩小乐(1990-), 男, 博士生, 主要从事山坡水文领域的研究。

¹河海大学水文水资源学院, 南京

²河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京

Email: hanxiaole90@163.com, jtliu@hhu.edu.cn

收稿日期: 2014年4月4日; 修回日期: 2014年4月9日; 录用日期: 2014年4月17日

摘要

本文探讨了变化环境下流域水文实验的发展问题。论文首先对国内外水文实验的发展历程进行了回顾, 概述了水文实验由单一要素水文观测, 发展到系统的流域水文实验, 再到整合地球物理化学等多学科的综合观测计划(如CZOs)的过程。在此基础上, 剖析了我国流域水文实验的发展现状, 认为现阶段流域水文实验在规范性、数据共享及学科交叉等方面存在欠缺, 在变化环境背景下, 已不能满足社会经济发展要求。最后指出, 多学科交叉的流域实验研究有助于提高我们认知并预测变化环境下的自然演化过程及其影响, 是未来水文实验观测的发展趋势。为此, 我们需要协调理论与实验观测、鼓励学科交叉研究以发展先进实验理念, 进一步规范数据观测, 积极加入国际地球物理化学领域的观测计划, 从而扩大成果产出及影响。

关键词

水文实验, 实验流域, 变化环境, 关键带观测计划

1. 引言

回顾水文学的发展历程, 人们对水文过程的认知及水文理论的发展总是取决于两个方面的工作进展, 即理论推演解析与实验[1]。前者属于经典的数学物理方法, 通过设定准则及逻辑推理得出新的描述水文过程的方程。后者则是自然科学产生和发展的重要前提[2]。国内外的研究显示: 迄今为止的水文科学的进展, 几乎都源于水文观测及实验工作。

水文实验研究向人们展示了不同尺度和气候带流域降雨径流过程中存在的巨大的变异性和复杂性, 提高了人们对水文过程的认识水平, 发展了水文学的基本理论[3]-[5]。然而, 水文实验研究面临两大挑战, 需要重新定位发展方向。首先, 野外实验揭示了不同气候类型、地貌条件、土壤及植被覆盖流域的水文过程现象, 但缺乏充分理论依据以外插、移用这些观测成果。其次, 在变化环境下, 地球物理化学过程变化剧烈, 这导致水文、物质循环规律发生变化, 以往研究单一界面而忽视整体研究的方法在尺度和精度上有明显不足, 缺乏多学科交叉的研究。

可以说, 气候变化及人类活动影响正在挑战现有的水文理论和方法, 水文实验研究同样不能幸免。针对此问题, 本文回顾了国内外流域水文实验的发展历程, 阐述了新时期水文实验发展的方向和最新理念。

2. 流域水文实验概述

19世纪前, 受经济社会发展水平的限制, 人们缺乏对水文现象的整体认识, 水文实验以单要素实验为主, 如雨量观测、明渠测流及渗流实验等等[6]。随着工业革命的出现, 人类对环境的影响加剧, 迫切需要从大的区域或流域角度来评价其水文效应。例如, 19世纪中叶, 爱尔兰工程师摩尔瓦尼(Mulvaney)发表了著名的推理公式, 这极大地促进了以“流域”为单元进行水文研究。19世纪末, 瑞士研究人员在

两个面积相近、森林覆盖面积不同的小流域上,进行了森林水文效应的对比研究[7],这被看作是世界范围内流域水文实验的开端。

真正意义上的流域水文实验始于20世纪30年代。1933年,前苏联瓦尔达依(Varda Bea)水文科学研究实验站建成,标志着系统的流域水文实验研究的开始[8]。随后,美国于1934年改建了克维塔(Coweeta)水文实验站,成为森林水文学与生态学研究的典范[9]。之后,世界各地纷纷开展流域水文实验研究,如1948年,德国的“Lange Bramke”、“Wintetal”流域实验研究[10];1953年,我国在淮北平原设立青沟径流实验站,即五道沟实验站的前身[11];1953年,捷克的“Červík”、“MaláRáztoka”两个小流域开始实验研究[12];1963年,波兰“Zagożdżonka”小流域的径流观测开始;1974年,新西兰Maimai流域水文实验研究开始[13]等等。

如果说,早期受观测技术及科学认识的限制,水文实验的对象限于山坡或小流域尺度。那么,20世纪80年代以来,随着“气候变化与水”成为全球科学研究的热点和前沿问题,水文学家开始以中尺度的流域为载体进行实验研究。这一时期,国际范围内组织了一系列科学计划,如全球能量和水循环实验(GEWEX)、国际地圈生物圈计划(IGPB)、全球水系统研究计划(GWSP)以及国际水文计划(IHP)。特别地,IHP提出了代表流域和实验流域的概念并成立了专门的工作组,这极大地促进了流域水文实验的发展[10]。这一时期开展了大量的大气、陆面及海洋上层的水文循环及能量通量观测与模拟研究,其最终结果用于指导全球和区域的气候变化研究,如亚洲季风区淮河流域能量与水分循环实验(HUBEX)以及中国科学院主持的亚洲季风青藏高原试验[14]。总体来说,我国在这一时期虽经济建设迅猛增长,但作为基础性研究的水文实验工作停滞不前,与社会经济的发展形成巨大反差。

进入21世纪,气候变化及人类活动影响加剧,导致地表圈层的演化速度加快。社会及科学界都迫切需要观测这种剧烈的变化,以采取应对措施。由于这种观测涉及多个学科,因此科学家需要一种涵盖水文学在内的整合各个学科特点、多要素协同观测的方法,关键带观测计划(Critical Zone Observatory, CZO)便应运而生[15]-[17]。CZO计划由美国科学家提出,它源自2001年美国国家自然科学基金委员会(NSF)提出的关键带(Critical Zone)的概念。2006年,美国特拉华大学宣布成立第一个关键带研究中心,从而进行有关近地表环境和地球生命维持系统的研究,至2009年,美国共建立了6个关键带观测站[18]。目前,世界范围内开展了众多的关键带观测工作,欧洲SoilTrEC(Soil Transformations in European Catchments)的4个关键带观测站,以及中国科学院的红壤观测站已被纳入全球关键带观测计划[16]。这种注重多学科交叉研究的关键带观测计划,为水文实验的研究提供了新的视角和学科增长点。

3. 我国流域水文实验的现状与问题

3.1. 现状

我国流域水文实验最早可追溯到建国前的1924年,南京金陵大学美籍教授罗德民在山西沁源县宁武东寨和山东青岛林场分别设置了径流泥沙实验小区,观测植被对山坡水土流失的影响。1953年,治淮委员会在淮北平原的青沟建立实验站,是我国系统的流域水文实验的开端。随后,尽管水文实验研究受不同时期的政策影响较大,但总的来说,在坎坷中得以发展,大致分为五个阶段[19],见表1。

由表1可以看出,我国的水文实验多由政府部门(如水利部)主导,其下属机构(如水文部门)建设管理,直接为国家水利建设服务,有较强的目标指向性。然而,其受国家、部门政策的影响也较大,如:在起步阶段,国家进行大规模的水利建设,迫切需要水文实验提供数据支持,因而对水文实验的投入也较大,从而达到发展的黄金期;随后的40余年至2007年,基础研究投入不足,水文实验停滞不前。据调查,我国水文部门现有45个实验站,多数实验站处于停测状态,仅淮委五道沟实验站,滁州水文实验基地等

Table 1. Different development stages for catchment hydrological experiments in China

表 1. 中国流域水文实验发展阶段

时间	发展阶段	典型站点	重大事件
1953~1962	起步阶段	淮委五道沟实验站(1953); 浙江水文局姜湾实验站(1953)	《全国径流实验站网规划(草案)》出台, 建立了第一批分布于主要气候区、水文区的径流实验站。
1966~1978	停滞阶段	安徽三连圩径流实验站(1971)	“十年文革”大部分水文实验站惨遭破坏。
1978~1990	恢复阶段	吉林星星哨径流实验站(1980)	1978年原水利电力部水文处召开全国径流实验交流会。 1986年原水利电力部水文局开展首次全国水文实验调查, 试图推动水文实验的新发展。
1990~2007	维持阶段	黄委会岔巴沟径流实验站(2003)	流域水文系统的径流实验站缺乏研究经费, 只有个别实验站勉强开展工作。
2008年后	全面规划 重建阶段	清华大学榆林生态水文实验站 (2011)	水利部水文局牵头开展全国水文实验站网规划工作, 计划恢复和重建一批水文实验站。

部分实验站开展研究工作。为使得社会发展与环境相协调,水利部水文局先后发文(水文科[2007]219号、水文科[2008]111号),以规划全国水文实验站建设布局。2009年11月,水利部水文局发布《全国水文实验站规划》,未来规划建设78个水文实验站。

3.2. 存在不足

1966年之前,新中国的流域水文实验得到长足发展,但现阶段仍然存在诸多问题,具体如下:

1) 水文实验的规范性较差

水文实验的规范性体现在多个方面,如观测数据的系统性、连贯性及观测标准的统一性。我国在20世纪50、60年代设立的实验流域中,仅有五道沟实验站的资料系列未间断。但在欧洲,许多实验小流域拥有长期不间断的观测数据。如:波兰“Zagożdżonka”小流域的径流观测从1963年开始从未间断;捷克的“Červík”、“MaláRáztoka”两个小流域自1953年开始观测降雨、径流,至今60余年;德国的“LangeBramke”和“Wintertal”小流域降雨、径流、积雪厚度等的监测自1948年开始至今。在观测标准的统一性方面,由于同属于一个科学计划或项目,欧美实验小流域的观测项目、频次及时段长度等一般有统一的标准,便于数据共享及观测成果的对比分析。目前,国内的实验小流域分属不同部门,还未能达到统一的观测标准。

2) 水文实验缺乏共享机制,理念落后

水文实验的开展耗费了大量的物力、财力,数据得来不易,但与之形成鲜明对比的是服务面较为局限、成果产出少(见表2)。造成这一局面的主要原因就在于数据缺乏共享。我们国家水文实验的指令性和指向性比较强,这在一定时期内能够达到集中力量办大事,如“起步阶段”(见表1)。然而,过多的政府行为,如类型人为设定,目标单一,即为水利工程服务,导致现有水文实验其工程意义远超其在科学上的价值。此外,办站的理念落后,缺乏共享机制,更谈不上学科间的交叉,从而限制水文作为基础行业的服务范围。

与之相对,国际组织开展的水文实验研究,重视多学科联动、科学与管理相结合。如上文所述的全球能量和水循环实验(GEWEX)开展了大气、陆面及海洋上层的水文循环及能量通量观测与模拟研究,通过气象与水文学科交叉,综合开展实验观测;国际地圈生物圈计划(IGBG)是从全球、区域和流域不同尺度和交叉学科途径,探讨全球变化和人类活动影响下的水文循环及其伴随的各种资源与环境问题;又比如近期的CZO计划从一开始就从一个多学科协作、数据共享的角度开展实验观测,把揭示并预测变化环境下地表圈层中生物、土壤和地貌的相互演化机制作为其目标。

Table 2. Number of publications for hydrological experimental stations in China and foreign countries
表 2. 中外水文实验站论文及著述成果对比

国别	站名	设站年份	学术论文及著述词条数(不完全) ^a
中国	五道沟实验站	1953	89
	姜湾径流实验站	1956	14
	滁州水文实验站	1981	28
	星星哨径流实验站	1980	1
美国	Coweeta 实验站	1934	3000
新西兰	Maimai 实验站	1974	2580

^a以上数据源自 Google 学术搜索。

4. 未来发展探讨

流域水文实验的发展往往受经济社会发展和环境变化的驱动。例如, 20 世纪 80 年代的一系列科学计划均是应对气候变化的影响而发起的, CZO 计划则是为了提高我们认知并预测变化环境下的自然演化过程及其相互影响。经过近 60 年的发展, 我国水文实验在水循环机理、水文测验仪器和测验方法的探索方面取得一定进步, 但与国际同行相比, 仍需在诸多方面进行加强, 比如科学理念、学科交叉、成果产出及社会影响等等。

4.1. 理论与实验观测协调并重

水文学科尚未巩固其作为一门科学的地位, 原因在于尚未能建立起坚实的科学基础[2] [20]。造成这一局面的原因有很多, 关键就在于水文过程及其存在介质具有强烈的时间非线性和空间异质性。为此, 许多水文学家试图用纯数学的方法解决复杂的水文问题。例如, 赵人俊教授曾指出[21]: “只要有一种新的数学理论问世, 在水文上都是有反映的, 如富里衰级数、概率论与数理统计和模糊数学等等, 其用于工程问题则可, 但揭发水文规律则无。”国际水文科学协会前主席科莱姆斯(Klemes)也曾呼吁[22]: 水文界应加强水文学的科学意义, 防止其偏离物理过程, 否则水文学将面临绝境。

显然, 单纯依赖数学手段是行不通的, 应加强实验和观测。流域水文实验为发现和认知水文规律提供实验平台, 同时也为基础水文研究的开展提供重要的平台。通过野外勘测与实验, 掌握流域下垫面结构和其要素分布规律, 以及它的水文影响, 进而准确描述这种规律性, 将为发展数学理论模型打下基础。应当注意到, 理论与实验是相互支撑的: 一方面, 没有哪一种水文理论是凭空想象的, 水文理论的进步依赖人们对流域自然结构和水文过程认知水平的提高; 另一方面, 理论的发展将提升人们预测水文过程、合理利用水资源的能力。未来, 水文学应立足于实验观测发展更为先进的理论方法, 如水文相似理论[23], 以使得水文实验观测、理论发展及工程实践三者更为紧密的联系。

4.2. 鼓励学科交叉研究, 发展先进实验理念

水文学本身就是一门交叉性很强的学科。水存在的介质(即大气、土壤、岩石、生物)具有多样性, 产生了水文气象学、水文土壤学及水文地质学等诸多交叉学科。其次, 水文过程取决于气象、土壤及岩石条件。因此, 水文实验所观测的项目及内容必然要求相关学科的介入。

此外, 气候变化及人类活动导致地表圈层的演化速度加快, 这种影响使得自然状态下几十万、几百万年的地球物理或化学变化在短短十几年, 甚至几年时间内完成。地表圈层的土壤、岩石和生物等的快速演化将改变固有的水的介质的分布格局, 进而改变水循环的规律性。如果不考虑这种变化, 那么无论

在基础理论研究或是模型建立上都会出现很大的误差。因而，未来水文实验研究也迫切需要找到一种包含水文学在内的整合各个学科特点、多要素协同观测的方法，以揭示变化环境背景下水循环及与之相关的物理的、化学的、生物的过程及演化机制，最终提升变化环境下自然、社会水系统的预测能力。这也是目前关键带观测计划的主要研究内容。以关键带为核心，整合水文学、地貌学、土壤地球化学、大气科学、生态学和基因组学等众多学科协同研究[24]，将为水文研究应对未来环境变化提供可能的出路。

4.3. 加入国际观测计划，规范观测扩大影响

一直以来，我们国家的水文实验由政府部门管理并面向水利行业服务。这一方面使得水文实验的服务对象和目标明晰，但另一方面，条块化的运行管理模式又限制了水文与相邻学科的交流与交叉，束缚了科学家的思维，人为地缩小了水文实验的服务领域。未来，水文实验的开展应更多的吸纳科学家携带项目加入，由水文学家参与设置部分实验项目，从而提高成果的水平及数量。此外，利用科学家在国内外的影响力，加入国际水文及相关领域的观测计划(如 CZO)，吸收先进的实验理念，有利于规范并提高我们自身的水文实验水平。最后，利用科学家具有的多学缘背景，增进学科间的交叉和交流，拓展水文观测实验的服务对象，扩大水文实验的影响范围。

5. 总结

本文系统地回顾国内外流域水文实验的发展历程，通过对比国内外水文实验发展状况，理清了国内水文实验发展的不足，即水文实验的规范性较差、实验成果共享及实验发展理念和欧美发达国家还有差距。此外，本文还探讨了在气候变化及人类活动干扰愈发严重的背景下，水文实验未来发展的的问题，指出协调理论与实验观测、鼓励学科交叉、规范数据观测及国际化是水文实验未来扩大服务范畴和成果产出的重要途径。需要强调的是，在变化环境背景下，水文学家在未来水文实验发展过程中，应与气候学家、土壤学家、地质学家、生物学家等形成合力，进行多学科交叉(如 CZO)、共同研究与人类密切相关的地表关键区域。

基金项目

国家自然科学基金项目(41271040, 51190091)。

参考文献 (References)

- [1] MAIDMENT, D. R. Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [2] 顾慰祖, 陆家驹, 唐海行, 等. 水文实验求是传统水文概念——纪念中国水文流域研究 50 年、滁州水文实验 20 年[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 368-378.
GU Wei-zu, LU Jia-ju, TANG Hai-xing, et al. Challenges of basin study to traditional hydrological conceptions: The 50 years anniversary of hydrological basin study of PRC and the 20 years anniversary of Chuzhou hydrological laboratory. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 368-378. (in Chinese)
- [3] BACHMAIR, S., WEILER, M. New dimensions of hillslope hydrology forest hydrology and biogeochemistry. In: LEVIA, D. F., CARLYLE, M. D. and TANAKA, T., Eds., Ecological Studies. Netherlands: Springer, 2011: 455-481.
- [4] 刘金涛, 冯德铿, 陈喜, 等. 应用 Péclet 数解析山坡结构特征的水文效应[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 1-6.
LIU Jin-tao, FENG De-zeng, CHEN Xi, et al. Application of the hillslope Péclet number for analyzing hillslope sub-surface flow responses in a real catchment. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] MCDONNELL, J. J., SIVAPALAN, M., VACHE, K., et al. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. Water Resource Research, 2007, 43: 7301-7306.
- [6] BISWAS, A. K. 水文学史[M]. 刘国伟, 译. 北京: 科学出版社, 2007.
BISWAS, A. K. History of hydrology. LIU Guo-wei, Trans. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [7] RODDA, J. C. Facets of hydrology. London: John Wiley & Sons, 1976: 257-297.

- [8] URYVAEV, B. A. 瓦尔达依水文实验研究[M]. 北京: 水利出版社, 1957.
URYVAEV, B. A. Study of hydrological experiment in Varda Bea. Beijing: Water Conservancy Press, 1957. (in Chinese)
- [9] KATHERINE, J. E., WAYNE, T. S. 美国克维塔水文实验站简介[J]. 植物生态学报, 1996, 20(4): 385-386.
KATHERINE, J. E., WAYNE, T. S. Brief introduction of Coweeta hydrologic laboratory. Acta Phytocologica Sinica, 1996, 20(4): 385-386. (in Chinese)
- [10] 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等. 国内外实验小流域水科学研究综述[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3): 259-267.
FU Cong-sheng, CHEN Jian-yao, ZENG Song-qing, et al. An overview on the water science researches at the experimental catchments in China and abroad. Progress in Geography, 2011, 30(3): 259-267. (in Chinese)
- [11] 王发信. 水文实验六十年[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 86-89.
WANG Fa-xin. Sixty years hydrological experiment. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(8): 86-89. (in Chinese)
- [12] International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. Federal Republic of Germany: Goslar-hahnenklee, 2009.
- [13] MCGLYNN, B. L., MCDONNELL, J. J and BRAMMER, D. D. A review of the evolving perceptual model of hillslope flow paths at the Maimai catchments, New Zealand. Journal of hydrology, 2002, 257: 1-26.
- [14] 马耀明, 姚檀栋, 王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet 与 CAMP/Tibet 研究进展[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 344-351.
MA Yao-ming, YAO Tan-dong and WANG Jie-min. Experimental study of energy and water cycle in Tibetan plateau——The progress introduction on the study of GAME/Tibet and CAMP/Tibet. Plateau Meteorology, 2006, 25(2): 344-351. (in Chinese)
- [15] LIN, H. Earth's critical zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14: 25-45.
- [16] FISHER, M. Investigating the earth's critical zone. CSA News Magazine, 2012-1-30(7).
- [17] SPARKS, D., BRANTLEY, S. and CHOROVER, J. Frontiers in exploration of the critical zone. Report of a Workshop Sponsored by the National Science Foundation (NSF), Newark, 24-26 October 2005.
- [18] 赵其国, 滕应. 国际土壤科学研究的新进展[J]. 土壤, 2013, 45(1): 1-7.
ZHAO Qi-guo, TENG Ying. New advances in international soil science. Soils, 2013, 45(1): 1-7. (in Chinese)
- [19] 王振龙, 赵晖. 淮河流域水文实验现状与新时期水资源研究的重点[J]. 地下水, 2009, 31(6): 65-67.
WANG Zhen-long, ZHAO Hui. The actuality and new date developing demand and matter of water resources experiment research in Huaihe River Area. Ground Water, 2009, 31(6): 65-67. (in Chinese)
- [20] 叶守泽, 夏军. 水文科学研究的世纪回眸与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 93-104.
YE Shou-ze, XIA Jun. Century's retrospect and looking into the future of hydrological science. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 93-104. (in Chinese)
- [21] 赵人俊. 从实际出发研究水文学[J]. 河海科技进展, 1991, 11(2): 78-81.
ZHAO Ren-jun. Be realistic in researching of hydrology. Advances in Science and Technology of Hohai University, 1991, 11(2): 78-81. (in Chinese)
- [22] KLEMES, V. A hydrological perspective. Journal of Hydrology, 1988, 100: 3-28.
- [23] 刘金涛, 宋慧卿, 王爱花. 水文相似概念与理论发展探析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 297-305.
LIU Jin-tao, SONG Hui-qing and WANG Ai-hua. Advances in the theories of hydrologic similarity: A discussion. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 297-305. (in Chinese)
- [24] HUXMAN, T., TROCH, P., CHOROVER, J., et al. The hills are alive: Earth science in a controlled environment. Eos, 2009, 90(14): 120.