

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.002

平原水文实验区(流域)的发展及应用

王船海^{1,2}, 华文娟¹, 杨海^{1,2}, 向小华¹, 李书建³

- (1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213000)

摘要: 通过对国内平原水文实验区(流域)的发展历程进行回顾,与目前国外水文实验区观测水平和研究方向进行简要对比,总结平原水文实验区在研究和应用中取得的主要成果及遇到的问题。以太湖流域平原的实验研究为例,分析金坛水文实验区的研究和建设过程,做出相关展望和提议,以期对未来平原水文实验区(流域)的新建、恢复和扩展提供参考。

关键词: 水文实验区;水文实验流域;平原区;发展历程;实验区建设;太湖流域;金坛水文实验区;综述

中图分类号:TV12;P33 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)01-0007-09

The development and application of hydrological experimental areas (catchments) in plains

WANG Chuanhai^{1,2}, HUA Wenjuan¹, YANG Hai^{1,2}, XIANG Xiaohua¹, LI Shujian³
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 10098, China;
3. Jiangsu Hydrology and Water Resources Investigation Bureau in Changzhou, Changzhou 213000, China)

Abstract: Hydrological experimental areas (catchments) in plains provide a base for conducting the field experiments, exploring the formation and physical mechanism of the hydrographic phenomenon, and studying the relevant methods. Abundant achievements have been obtained and many problems arose in the construction and research during the 60-year tortuous development. This paper reviewed the development history and current situation of hydrological experimental areascatchments) in plains in China and abroad. Besides some main achievements, general historic problems during the establishment of experimental areas(catchments) in plains were revealed and a few meaningful lessons were drawn from the past. Additionally, we took the experimental research work in the plain of Taihu Lake Basin as an example and introduced the particular research goals as well as the related establishing process. We hope that it can provide a reference for the newly-building, recovering and extending of the hydrological experimental area in plains in the future.

Key words: hydrological experimental area; hydrological experimental catchment; plain area; development history; experimental area construction; Taihu Lake Basin; Jintan hydrological experimental area; review

平原地区一般具有河流集中、人口密集、经济发达等特点,其农业生产和经济发展都需要水文学科给予

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-011);江苏省水利科技项目(2015007);国家自然科学基金(41201030);中央高校基本科研业务费专项(2017B608X14);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0411)

作者简介: 王船海(1963—),男,教授,博士,主要从事水文及水动力学研究。E-mail: wangchuanhai@vip.sina.com

通信作者: 华文娟,博士研究生。E-mail: huawenjuan0106@126.com

引用本文: 王船海,华文娟,杨海,等. 平原水文实验区(流域)的发展及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):7-15. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.002.

极大的技术支持和安全保障,包括灌溉、调水取水、防洪治涝等。对水文认知的深入是通过水文观测、实验和测量工作获得的^[1],水文实验研究常被认为是水文科学发展的基础和必要条件^[2-4],而水文实验区(流域)则是水文实验研究的重要基地^[4]。历史上,许多小实验流域的研究都极大地加深了对水文过程的认识、提高了水文模拟水平^[5-6],因此,实验区(流域)的建设和研究对水文科学的发展意义重大^[7]。

在过去30年里,国内外曾涌现出一批针对平原区水文特征而开发的水文模型^[8-12],但随着分布式架构^[13]、精细化模拟需求的提出,原有模型对平原区水文过程的深入描述仍然存在许多不足,其中一个重要原因是缺乏区域代表性强、规划目标明确、建设维护优良的平原水文实验区(流域)观测资料的支撑。特别在近些年,我国水文实验区的整体发展处于萎缩状态,在水文系统在册的60个水文水资源实验站中,正常运行的寥寥无几,水文基础理论的实验研究严重影响了水文科学的发展^[14]。而在现有的水文实验站中大部分实验站设备陈旧、老化,处于停止实验状态,仅有五道沟、太谷等少数实验站仍在坚持开展实验研究^[15]。

本文旨在梳理国内外平原水文实验区(流域)建设和研究的发展历程和现状,总结长期以来取得的成果以及存在的一些现象和问题,从中得到经验和启示,为未来开展平原实验区的建设和相关研究提供建议。同时以太湖流域平原区的金坛水文实验区为例,分析该实验区的研究和建设过程,以期对未来平原水文实验区的建设发展和研究提供参考。

1 相关认识

平原是陆地上海拔高度较低(一般小于200 m)、地表起伏微缓的平坦地区^[16],其相对高差通常不超过30 m^[17],坡度不超过 7° ^[18]。世界上的平原区面积广大,约占全球陆地总面积的33%^[19]。在我国,平原区约占国土总面积的12%^[20]。平原区多为河流集中地,土地肥沃,灌溉方便,是各地农业生产的重要基地,同时也是人口高度聚集、经济较发达的区域^[20-21],因此平原在各区域都具有极重要的社会、经济地位。但因其低洼的地势、极缓的坡度,平原区时常遭受洪涝灾害的影响^[21],以及暴雨过程中所引起的土壤侵蚀^[22]、田间营养物质迁移^[23-25]等问题也逐渐引起人们的关注。由于受自然地形、人类活动、地下水等多方因素的综合影响,平原区的水文过程机理复杂,暴雨径流过程迥异于山丘区^[26]。

水文实验研究是为研究水文现象的一些基本规律或为某些专门目的而进行的水文观测实验^[27],而建立水文实验研究区是重要途径之一^[28]。从广义而言,野外的地理研究对象在水文中均可称之为“研究区”,“实验流域”这一术语正式提出于1965—1974年的国际水文十年科学计划(IHD)^[29]。实验流域的面积依据研究目标等确定,不同国家对各类型实验流域的限定面积标准也不同^[7],若考虑流域的综合特性,认为流域内土壤、植被条件应相对均一,则实验流域面积可限定在 4 km^2 以内^[30]。此外较普遍的实验区类型为径流场(runoff plot),一般是指利用人工墙将其与周围地区隔离的小块土地,通常根据面积^[31]可分为田块径流场(field plot)、小尺度径流场(small-scale plot)及微型径流场(micro-plot)^[32]三类。径流场因尺度较小,当实验观测项目较多时,对时间测量精度要求较高^[33],这也使得小型径流区的实测数据量反而较大。

对于平原区而言,因其地势平坦,在实际的大雨强蓄满产流时很难找到明确的分水岭和流域边界^[34],因此多数为实验区,特别是那些被沟渠、道路、水系等切割剧烈的平原农田区,但也有选择面积较大、地势起伏稍剧烈地区的研究,若选择适宜,也能近似满足水文学中对流域的定义。

2 建设与发展

2.1 国内平原水文实验区(流域)回顾与现状

国内平原水文实验区(流域)的建设始于1953年青沟径流实验站,3年后因流域界限不清、资料缺乏代表性而撤销,其人员、设备皆并入五道沟实验站,即现今的五道沟水文水资源实验站。随后60多年间,平原水文实验区(流域)的建设经历了曲折的历程,国内平原区的发展也与国内实验流域发展的大背景过程基本一致^[2],可大致分为5个阶段:

a. 1952—1966年是平原水文实验区起步及大发展的黄金时期,许多的站点开始兴建,但同时又有一些站点在1960年左右撤销。

b. 1966—1986年的停滞倒退期,虽然该阶段运行的站点数并没有衰退,但因受政治运动的影响,许多水文实验区并未更新和发展,仅勉强支撑运行。

c. 1986—1989年的短暂复苏期,主要受到1986年水利电力部水文局组织的全国水文实验调查工作的推动^[7],这一举措促进了部分地区水文实验区建设的复兴,华北平原的水文实验研究即在此时开始,五道沟实验站也在此期间有许多恢复和更新^[35]。

d. 1989—2006年是维持和停滞期,在此期间没有新站点投入建设,加之市场经济的发展促进了科研体制的改革,实验研究经费的短缺使原有的运行站点难以开展针对性的实验。

e. 最近10年间,受到2006年水利部水文局再次开展的水文实验站调查工作的影响,一些小型科研型水文实验区开始兴建,同时不少实验小流域的建设也在逐步纳入规划中^[3]。

本文对中国现存及历史时期存在过的水文实验区(流域)进行了统计^[7, 24, 36-46],发现其分布呈现出鲜明的地域特征,90%的水文实验区(流域)分布在黑河—腾冲线分界线^[47]以东,这一分布特征与我国人口、地理、气候的分界相吻合。现今仍处于运行状态的站点多数集中于东部平原(主要为华北平原、太湖流域平原、黄淮平原)及其周边的山丘区。

2.2 代表性实验区(流域)建设与研究概况

现今仍在运行的平原水文实验区(流域)对推动平原区水文机理的深入探究意义重大。国际上最早开展的平原水文实验区建设与研究或始于1933年苏联瓦尔达依水文实验站的建立,其中坡度很缓的涧谷集水区可作平坦流域^[48]。根据2009年召开的国际会议“International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins”以及国外平原水文研究中一些典型的实验区(流域)^[21, 49-50],11个主要的平原实验区(流域)的多年平均降雨量在500~893 mm之间,多属半湿润气候区。实验流域面积最大的是最早建立的Butenya流域(70.320 km²)。各实验区的地域背景差异较大,既有受潮汐影响的沿海区(Ems河流域),也有植被多元区(林地、耕地、草地等混合)以及荷兰的典型地下水浅埋区。国内实验区都是在历史的各个发展或恢复期兴建的,包括20世纪五六十年代起步期的4个(五道沟、汉川、台安、双林)、80年代末恢复期兴建的4个(太谷、冉庄、衡水、汉王)以及最近10年来建立的3个(崇凤圩、尖圩、金坛)。淮北平原、江汉平原、辽河平原及太湖平原最早开展平原水文实验区建设,而华北平原直至在20世纪80年代末才开始兴起,最近10年中建设的实验区都位于江苏省的平原区。虽然各实验区都属平原区,但因气候特征、地下水埋深、土壤质地、土地利用类型等情况的不同,各区域的水文过程机理也存在较大差异。大多数实验区(流域)都设有不同规模的径流场,从长远规划考虑这种大区套小区的建设方式和原则是较可取的^[51],对平原区水文过程尺度效应的探究具有重要意义^[52]。

观测项目是实现平原水文实验区(流域)研究目标的重要基础,我国在平原圩区开展径流试验主要有5类观测项目,包括水量、土壤-水分物理特性、田间试验、地面气候观测以及区域内情况调查^[51]。现今实验区主要关注水量方面的研究,区域的试验工作除了径流研究和水量计算外,还须向综合试验发展才能收到良好的成果,因此一些实验区已经开展诸如水质^[24, 53-54]和作物需水方面的观测,这将是平原水文实验区未来发展的必然趋势。就国外目前的观测水平,其主要在3个方面具有相对优越性:(a)观测数据的完整性。尽管各国的观测水平参差不齐,但欧洲许多国家的水文实验区都具备50 a以上的长期连续的观测资料,例如,荷兰面积为6.5 km²的Hupsel Brook和乌克兰面积为70.3 km²的Butenya平原水文实验区(流域)。除了观测时段的长度和连续性,观测频率和观测密度也是决定数据质量的重要因素。(b)观测项目的综合性。国外的实验区(流域)更加综合化,很多实验流域进行了多个项目的观测,包括降雨、蒸发、流量、地表水位、地下水位、积雪深度、土壤含水量、地表地下水交互、沟渠小溪与排水沟流量等水量检测项目,O₂、氮磷硫、硝酸盐稳定同位素、地表地下水化学组分等水质观测项目,以及温度、湿度、风速风向、基质势等一些气象要素或物理量。总体上其水质的监测类型较之国内更加丰富多样,此外如Ems河流域更拓展至泥沙和生态环境的观测(土壤发生、侵蚀和泥沙过程、潮汐动态变化、物种组成等)。(c)观测标准的统一性^[7]。在研究过程中,往往对观测时段、观测频率和观测项目等要求用统一的标准,若前期观测标准千差万别,后期在数据检查、分析和共享时将耗费大量的时间和精力,目前国内在这方面仍然有待完善^[7]。

针对平原水文实验区(流域)的研究按研究性质可分为两大类:(a)实验观测研究。其中较受关注的有对土壤水的研究(根系吸水、优先流、侧向流、深层渗漏等)、界面水文过程研究^[7](大气、植被、土壤、水体、岩石等之间的界面)、人为因素影响下的水文过程(灌溉、污染、土地利用、气候变化)等研究热点。(b)模型模拟研究。包括新模型构建、现有模型应用、模型改进、计算及方法优化、参数率定及敏感性分析、水文非线性

问题研究、不确定性研究等。当然,也有很多研究综合这两方面来开展,以实测资料为基础和根据,用模型模拟进行深入探究;或结合理论和实际构建模型,用实测数据进行验证分析;水文尺度问题等水文难题的研究。按研究内容又可归纳为水循环物理机理研究、水质水环境研究、土壤泥沙运动研究等几大类。从平原水文实验区(流域)整体的建设和研究水平看,我国在水量方面已经有一定的基础和竞争力,但从综合的观测技术和经验上,仍与国外平原水文实验区(流域)有一定的差距,可能仍无法满足未来探究各区域特征水文过程机理的需求。

3 成果与经验

3.1 成果与贡献

针对平原区水文过程机理的研究始于20世纪80年代,随着我国水文水资源数据的大量收集和检验以及水文试验的开展,将理论与各工程规划紧密结合^[55],提出了一些极富洞见、物理意义明确的平原区水文模型。譬如:1982年Minderhoud^[12]提出决定排水措施和损耗的平原地下水浅埋区模型,国内学者陈沂^[56]又在其基础上进行改进,较好地应用于我国东部平原地区。刘新仁等^[8-9]在淮北平原的汾泉河流域自主开发了平原区水文模型,其模型结构上充分考虑了平原区地下水浅埋的水文特征,推动了国内平原区水文机理研究及应用的发展。还有部分实验站虽然由于经费投入不足等原因已经停止实验,但其在全国水文领域具有较高的知名度,对水文基础理论研究和实际应用都做出过杰出贡献。例如:浙江姜湾径流实验站,其成果包括姜湾径流模型等被大量应用;鄱阳湖水文实验站,其大水体蒸发试验成果一直是历次水资源评价的重要依据。

进入21世纪,计算机技术发挥出巨大优势,在几十年的资料基础上,许多试验站已逐步进入成果收获期。以五道沟实验站为例,在其对前期实验观测成果进行系统整理分析的基础上,陆续提出了给水度、降水入渗补给系数、潜水蒸发规律、径流系数,以及五道沟水文模型、淮北平原“四水”转化水文模型等标志性成果。另外,王船海等^[10]、程文辉等^[11]将平原河网区的下垫面分为水面、水田、旱地和城镇四类,分别采用不同的产流模型,根据圩区内外不同的汇流特性,采用不同的汇流处理模式,在太湖流域平原区的适用性较好。国外有在南非和美国佛罗里达州应用的ACRU2000模型^[57-58]、荷兰的WALRUS模型^[21]及其改进版的WALRUS-paddy模型^[59]等。

在实验仪器和设备上,也逐渐实现了标准化、规范化和自动化。例如,进入21世纪的五道沟实验站,其实验仪器设备得到了全面更新(包括从德国引进的一台具有国际先进水平的自动称重式蒸渗仪于2010年投入使用),实验楼和进站道路等硬件设施也全部得到新建或改建^[35]。后期建设的一些水文实验区也多引进和应用国际上较为先进和认可度高的野外试验监测仪器和设施;结合遥测及数据远程传输,配备在线数据实时查询与预览功能,设立远程视频监控系统等以便实时监控实验区水文过程,提高作业效率。

3.2 历史问题与经验总结

一般而言,实验区(流域)撤销的根本原因是无法达成起初建立时的研究目标。山丘区水文实验站常因观测区域环境条件发生变化而撤销或停止观测^[40],如兴建水利工程、从外部引水等,而对于地势平坦的平原区,水文实验区(流域)受外界、内部条件影响而撤销的原因仍需进一步回顾和总结。前人在这些失败的案例中总结经验教训,并在这些站点附近继续建设了延续至今的平原水文实验区(流域),如青沟径流实验站重建为五道沟水文实验站,孙家坪水文实验站和沔阳实验站分别为双林水文实验站和汉川水文实验站。

历史上平原水文实验区(流域)建设中存在的问题主要有两类,即:实验区选址问题和测量技术问题。不难发现,越是大型平原水文实验区越容易产生较严重的选址问题,这主要与平原区独特的地形特征及受人类活动影响密切相关。在大面积平原实验区建设中,为避免区域的产流因地势平坦而无法到达出口,更周全的区域水量平衡项的测量是测准全区产流量的要点。从严格意义而言,平原区并没有流域的概念,出口的出流量并不能代表区域的实际产流量,如此就无法算准区域水量平衡各要素,再加之大范围模糊复杂的区域边界,使得实验中的测量颇为困难。因此从历史中可以借鉴的经验有以下几项:(a)在依据研究目标进行选址中,需对待定区域开展更充分的勘察和实地调研工作;(b)平原实验区面积不宜过大;(c)保证实验区边界的隔离,如沔阳和汉川站使用堤埂进行隔离,并在地表建立人为的闭合集水区;(d)实验区建成后,仍需在降雨期围绕区域边界进行人工检查,确保边界没有明显的串水现象;(e)若实验区域的人工沟渠较多,需考虑在内部进行更密集的地表水位、流量的监测。

笔者认为未来平原水文实验区(流域)的建设与应用应在以下几个方面予以加强:(a)从国家层面,需进一步投入科研经费以恢复、扩建、增设专门性平原水文实验站,配套相应的人才及先进的设备物质资源^[42],并提前进行长期和短期规划,分期分批付诸实施;(b)由各流域管理机构牵头,整合平原水文实验区信息资源,建立实验区信息分享平台,定期组织管理方交流分享建设经验、研究方向以及可共享数据序列;(c)向国外更综合的实验区管理机构学习并探讨建设过程及研究计划,从中吸取有益经验;(d)完善和明确管理体制,对于水文实验区的管理和维护制定明确规范,并联合地方水利管理部门,把实验站纳入国家基本站网的管理计划中,形成长期有效的合作机制。

4 平原水文实验区(流域)建设与研究案例

为对平原水文实验区(流域)的建设过程及研究内容有更加直观的认识,以太湖流域平原金坛水文实验区为例,就其研究背景、目标以及建设概况进行介绍。

4.1 实验区建设背景和研究目标

影响水文过程最重要的因素是外部的驱动条件(如降雨、降雪、蒸发等)以及区域下垫面特征,因各平原所处气候区的不同,外部驱动条件无法得出普遍特性,但下垫面特征却在平原区有许多相似之处,并且决定了区域水文过程机理研究的复杂性,总结而言主要有三大因素:受人类活动影响大^[60-62]、地下水埋深较浅^[63-66]、地表径流受到微地形的控制^[13, 67-68]。虽然前人针对平原区建立的模型众多,但因研究区较大,其中缺少动力过程的详细描述。仍需建设小型代表径流实验区,并进行观测及精细化模拟研究,这需要野外观测数据的支撑^[69]。由此对太湖流域平原区水文过程机理的研究提出 3 个目标:(a)地下水位快速响应研究;(b)受地下水浅埋影响的微地形地表产流机理研究;(c)小区域水文过程机理的尺度转换研究。在小尺度过程模拟和田间研究的基础上,利用相关方法进行尺度转换可以得到流域尺度的水文过程模型^[70]。

4.2 金坛水文实验区建设

平原水文实验区(流域)的建设应依据研究目标进行逐步规划。针对上述 3 个研究目标,其所需的实验区尺度逐渐扩大,第 1 个仅需较小的点尺度进行观测研究,第 2 个则需要较大的田块尺度,并配备地表径流的采集观测,第 3 个需要更大的嵌套区域进行观测。因此,实验区的建设需要设立长短期结合的研究计划,逐步开展建设^[14]。在实验初期,建立小型的径流实验场既能满足前 2 项研究目标,也能在人员配备、资金投入上做到平衡。

实验区选址是组织观测和研究的第一步,也是最重要的一步^[30]。选址尽量远离太湖湖区,以削弱大区域水体对研究区水位的顶托影响。考虑除水面外,水田实质是不同水头条件下的改造型旱地,城市则是表面覆盖不透水或弱透水层的旱地,因此将旱地的降雨-径流机制作为待建实验区的研究方向。最终将湖西平原区一邻河水稻田改为旱地进行监测研究,总尺寸约 85 m×10 m,该地区多年年均降水量为 1 063.8 mm,有 3 个明显多雨期:4—5 月为春雨期,6—7 月为梅雨期,9—10 月为台风秋雨期。其中 4—9 月的降水量约占全年的 3/4^[71]。

根据研究目标对实验区进行施工改造及仪器布设。考虑地下水观测井及其详细位置、地质描述、土壤水力特征、水文条件(降雨等气象因子)、土壤类型、前期土壤湿度、水井类型和设计,记录装置、雨量站和水井的相近性等^[69]。实验区内布设相关监测仪器,采集田间五大类观测数据,即气象、土壤水、地下水、地表水及人工实验数据。数据采集基本实现遥测及数据远程传输,并配备在线数据实时查询与预览功能。水文实验的探究在目的明确、资金到位且有相关经验的受训人员^[28]的条件下开始进行。实验区的观测设备昂贵、人力成本日增,实验区的维护运行需要稳定的资金支持,若继续第 3 项研究目标,无疑需进行大面积的区域观测,将田块尺度拓展至大范围的圩区观测,其中将涉及更多复杂因素。

4.3 金坛水文实验区现状

金坛水文实验区自 2011 年 9 月开建以来监测设备逐渐完善,并于 2013 年 3 月建成后处于持续稳定的数据监测状态中。自仪器安装运行后,收集了 2012 年 9 月 9 日至今的观测数据,为避免仪器安装过程中观测区土层轻微扰动的影响,故收集和整编 2012 年 10 月稳定以后的数据,并置于数字流域系统网站供每日在线查询。

相较于太湖平原的另外 2 个水文实验区(双林、尖圩),金坛平原水文实验区的面积最小,适合进一步的

微地形研究和升尺度研究;其地下水埋深最浅仅0.1~1.5 m,更具区域代表性;观测项目较为综合,能够实时监测多个剖面不同深度的土壤含水量,这对于地下水浅埋平原区的研究可谓是必不可少的,且金坛水文实验区已考虑后期加入水质观测项,进一步完善监测项目。以该平原水文实验区为基础,先后进行了“耦合浅层地下水的平原区产流模型”研究、“平原区三维饱和非饱和土壤水运动试验与模型研究”、“地下水浅埋条件下平原区产流机理研究”等逐步深入的研究。期间在实验区开展过土壤含水率烘干法校正、小型人工降雨试验、下渗着色剂示踪试验以及土壤水分特征曲线委托测定等研究工作。

5 总结与展望

平原水文实验区(流域)作为水文科学发展的重要依托之一,不仅需要在其建设方面予以完善,也应注重其所承载的科研目的。从研究目的和实际需求出发设计和建设平原水文实验区(流域),有利于系统地考虑复杂环境下的客观问题,可促进后期研究的开展和有效成果的收获。本文系统综述国内平原水文实验区(流域)的发展历程,以及国外目前观测水平和研究方向及其研究、应用的成果和经验,分析了太湖流域金坛水文实验区的研究和建设实例。

尽管平原水文实验区(流域)的建设和研究面临困难和挑战^[72],现在的趋势逐渐从野外工作向更多纯数值模拟转变^[73],但实验区的研究对理论模型的价值^[74-75]是无可替代的,新时期加强水文实验仍是极其迫切的需求和发展方向^[4]。从整体而言,我国平原水文实验区(流域)的分布仍不均衡,现有的实验站点密度不足、区域分布不合理,无法满足对我国当前洪涝灾害、水资源短缺、水污染和水生态等问题研究的需要^[3]。未来的实验将走向多学科交叉、多领域专业人员合作的多元模式^[76],并从以水文基础理论,发展成水量、水质、泥沙和生态等多领域的研究^[28]。平原区的水文尺度研究可能成为极重要的方向,当不同下垫面类型的代表水文实验区在水文过程机理上有深入揭示并在区域尺度上有所拓展后,集成这些资料后开展更大区域的尺度转换研究将极具可能,这将为开发具有扎实物理机理的平原区综合尺度化水文模型奠定基础。

致谢:感谢参与实验区仪器设备安装、维护的茅志兵老师以及负责数据库管理及在线数据浏览模块开发的孙玉龙老师,感谢在实验区选址、施工、测量上给予多方帮助的常州水文局各位同仁。

参考文献:

[1] KIRCHNER J W. Getting the right answers for the right reasons: linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology[J]. Water Resources Research, 2006,42(3):113-115.

[2] 王振龙. 安徽省水文水资源实验现状与新时期研究重点[J]. 江淮水利科技, 2010(1): 43-45. (WANG Zhenlong. The actuality and new date developing demand and matter of hydrological and water resources experiment research in Anhui Province [J]. Jianghuai Water Resources and Technology, 2010(1): 43-45. (in Chinese))

[3] 董秀颖,蒋蓉,李舒宝. 水文实验研究的现状与发展探讨[J]. 水文, 2013,33(6):21-24. (DONG Xiuying, JIANG Rong, LI Shubao. Discuss on development of hydrological experimental stations[J]. Journal of China Hydrology, 2013,33(6):21-24. (in Chinese))

[4] 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 Zhenlong, ZHAO Hui. The actuality and new date developing demand and matter of water resources experiment research in Huaihe River Area[J]. Ground Water, 2009,31(6):65-67. (in Chinese))

[5] WARMERDAM P M M, STRICKER J N M. Fundamental hydrological research results drawn from studies in small catchments [C]//ANON. Proceedings of the International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. Germany: Goslar-Hahnenkle, 2010:47-54.

[6] 闻昕,丁紫玉,方国华,等. 气候变化下新安江-富春江水电站径流响应模拟及适应性调度研究[J]. 水资源保护,2017,33(4):10-19. (WEN Xin, DING Ziyu, FANG Guohua, et al. Study on runoff response simulation and adaptive scheduling of Xin'anjiang-Fuchunjiang hydropower station under climate change[J]. Water Resources Protection, 2017,33(4):10-19. (in Chinese))

[7] 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 Congsheng, CHEN Jianyao, ZENG Songqing, et al. An overview on the water science researches at the experimental catchments in China and abroad[J]. Progress in Geography, 2011,30(3):259-267. (in Chinese))

- [8] 刘新仁,王玉太,朱国仁. 淮北平原汾泉河流域水文模型[J]. 水文, 1989,9(1):12-18. (LIU Xinren, WANG Yutai. Hydrologic model of Fenquanhe catchment in Huaibei Plain Area[J]. Journal of China Hydrology, 1989,9(1):12-18. (in Chinese))
- [9] 刘新仁,费永法. 汾泉河平原水文综合模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1993,21(6):10-16. (LIU Xinren, FEI Yongfa. Fenquanhe plain area comprehensive hydrologic model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1993,21(6):10-16. (in Chinese))
- [10] 王船海,王娟,程文辉,等. 平原区产汇流模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007,35(6):627-632. (WANG Chuanhai, WANG Juan, CHENG Wenhui, et al. Numerical simulation of runoff yield and confluence in plain area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(6): 627-632. (in Chinese))
- [11] 程文辉,王船海,朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京:河海大学出版社,2006:180.
- [12] MINDERHOUD P. A model for the design of drainage in flat agricultural lands[J]. Agr Water Manage, 1982, 5(2): 95-125.
- [13] 王船海,闫红飞,马腾飞. 分布式架构水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009,37(5):550-555. (WANG Chuanhai, YAN Hongfei, MA Tengfei. Distributed hydrological model[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2009, 37(5): 550-555. (in Chinese))
- [14] 夏自强,章沐霖,段哲古. 天津市水文水资源实验站建设研究[C]//张建云. 2004 年全国水文学术讨论会文集. 南京:河海大学出版社,2004:102-106.
- [15] 王振龙. 淮北平原区水文实验研究[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2011.
- [16] 《中国地貌图集》编辑组. 中国地貌图集[M]. 北京:测绘出版社,1985:209.
- [17] 周成虎,程维明,钱金凯,等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报,2009,11(6):707-724. (ZHOU Chenghu, CHENG Weiming, QIAN Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(6): 707-724. (in Chinese))
- [18] 刘南威. 自然地理学[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2007:656.
- [19] 潘凤英,沙润,李久生. 普通地貌学[M]. 北京:测绘出版社,1989:220.
- [20] 曾昭璇. 中国地貌[M]. 济南:山东科学技术出版社,1981:281.
- [21] BRAUER C C, TEULING A J, TORFS P J, et al. The Wageningen lowland runoff simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 7(5): 2313-2332.
- [22] WARSTA L, TASKINEN A, KOIVUSALO H, et al. Modelling soil erosion in a clayey, subsurface-drained agricultural field with a three-dimensional FLUSH model[J]. Journal of Hydrology, 2013, 498(16): 132-143.
- [23] 张继宗,张维理,雷秋良,等. 太湖平原农田区域地表水特征及对氮磷流失的影响[J]. 生态环境学报, 2009,18(4): 1497-1503. (ZHANG Jizong, ZHANG Weili, LEI Qiuliang, et al. Surface water characteristics of farmlands area and the impact of nitrogen andphosphorus losses from farmland in Taihu Lake region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1497-1503. (in Chinese))
- [24] 陆海明,孙金华,邹鹰,等. 平原河网区径流小区和田块尺度地表径流磷素流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2013,29(2):176-183. (LU Haiming, SUN Jinhua, ZOU Ying, et al. Characteristics of phosphorus loss with surface runoff at plot and field scales in the plain river network region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(2): 176-183. (in Chinese))
- [25] 管仪庆,陈玥,张丹蓉,等. 平原河网地区水环境模拟及污染负荷计算[J]. 水资源保护,2016,32(2):111-118. (GUAN Yiqing, CHEN Yue, ZHANG Danrong, et al. Aquatic environmental simulation and pollutant load calculation in plain river networks[J]. Water Resources Protection,2016,32(2):111-118. (in Chinese))
- [26] CERDAN O, BISSONNAIS Y L, GOVERS G, et al. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299: 4-14.
- [27] 夏征农. 工程技术分册[M]. 上海:上海辞书出版社,1987:1319.
- [28] 顾慰祖,吴学鹏. 实验流域[EB/OL]. [2016-10-22]. <http://www.chinabaike.com/article/baike/wli/2008/200801101128157.html>.
- [29] 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 Weizu, LU Jiaju, TANG Haixing, 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[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 368-378. (in Chinese))
- [30] TOEBES C, OURYVAEV V. Representative and experimental basins: an international guide for research and practice[R].

- Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1970: 348.
- [31] HUDSON N W. Field measurement of soil erosion and runoff[M]. Roma: FAO Soils Bulletin, 1993: 140.
- [32] MINEA G, MOROSANU G A. Micro-scale hydrological field experiments in Romania[J]. Open Geosciences, 2016, 8(1): 154-160.
- [33] DEELSTRA J, EGGESTAD H O, IITAL A, et al. Time resolution and hydrological characteristics in agricultural catchments [J]. IAHS-AISH Publication, 2010, 6: 138-143.
- [34] 王振龙,王加虎,刘森,等. 淮北平原播乃当转化模型实验研究与应用[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2194-2203. (WANG Zhenlong, WANG Jiahu, LIU Miao, et al. A study of the four water phases transformation lumped model in the region of Huaibei Plain and its application[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(12): 2194-2203. (in Chinese))
- [35] 王发信. 水文实验六十年[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 86-89. (WANG Faxin. Review of hydrological experiment in the past sixty years[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(8): 86-89. (in Chinese))
- [36] 黄河水利委员会水文局. 黄河水文志[M]. 郑州: 河南人民出版社, 1996: 761.
- [37] 海河志编纂委员会. 海河志: 第4卷[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 694.
- [38] 尤志方. 辽河志[M]. 长春: 吉林人民出版社, 2000: 388.
- [39] 水利部水文司. 中国水文志[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 688.
- [40] 长江水利委员会水文局. 水文、勘测[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2000: 342.
- [41] 《苕溪运河志》编纂委员会. 苕溪运河志上[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 684.
- [42] 王振龙,郑三元,章启兵. 安徽省水文水资源科学实验站网规划研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(8): 13-14. (WANG Zhenlong, ZHENG Sanyuan, ZHANG Qibing. Planning study on hydrological and water resources experimental station network in Anhui Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(8): 13-14. (in Chinese))
- [43] TAN Xuezhi, SHAO Dongguo, GU Wenquan, et al. Field analysis of water and nitrogen fate in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D[J]. Agr Water Manage, 2015, 150: 67-80.
- [44] 陈宝根,王仕琴,宋献方. 一维土壤水分运动模拟在土壤水分特征研究中的应用: 以华北平原衡水实验站为例[J]. 水文, 2011, 31(3): 64-70. (CHEN Baogen, WANG Shiqin, SONG Xianfang. Application of 1-D soil water movement simulation in research on soil water characteristics: a case of Hengshui experimental station[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(3): 64-70. (in Chinese))
- [45] 王仕琴,宋献方,肖国强,等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 495-501. (WANG Shiqin, SONG Xianfang, XIAO Guoqiang, et al. Application of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 495-501. (in Chinese))
- [46] 徐州市水文分站. 汉王水文水资源试验站简介[J]. 江苏水利, 1988(1): 57-59. (Xuzhou Hydrological Station. A brief introduction of Hanwang experimental station of hydrology and water resources[J]. Jiangsu Water Resources, 1988(1): 57-59. (in Chinese))
- [47] 胡焕庸. 中国人口之分布[J]. 地理学报, 1935, 2(2): 33-74. (HU Huanyong. Population distribution of China[J]. Acta Geographica Sinica, 1935, 2(2): 33-74. (in Chinese))
- [48] URYVAEV B A. 瓦尔达依水文实验研究[M]. 北京: 水利出版社, 1957.
- [49] BRAUER C C, TEULING A J, OVEREEM A, et al. Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2011, 15(6): 1991-2005.
- [50] APPELS W M. Water redistribution at the soil surface: ponding and surface runoff in flat areas[D]. Wageningen: Wageningen University, 2013.
- [51] 徐国顺. 开展圩区的径流试验工作简介[J]. 水文, 1959(10): 19-20. (XU Guoshun. A brief introduction of conducting experimental work about runoff in polder areas[J]. Journal of China Hydrology, 1959(10): 19-20. (in Chinese))
- [52] HAN Songjun, XU Di, WANG Shaoli. Runoff formation from experimental plot, field, to small catchment scales in agricultural North Huaihe River Plain, China[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2012, 16(9): 3115-3125.
- [53] HUANG Jiacong, GAO Junfeng, YAN Renhua. A phosphorus dynamic model for lowland polder systems (PDP)[J]. Ecological Engineering, 2016, 88: 242-255.
- [54] 黄佳聪,高俊峰. 平原圩区磷素流失过程模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 216-226. (HUANG Jiacong, GAO Junfeng. Phosphorus loss simulation of lowland polder system[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 216-226. (in Chinese))
- [55] JIN Guangyan, XI Ruze. The advance on computation technique of hydrology and water resources in plain region[M]. London:

- CRC Press, 2004: 73-80.
- [56] 陈沂. 对平原地区降雨径流模型问题的探讨[J]. 海河水利, 1987(5): 6-12. (CHEN Yi. Discussion on the problem of rain-runoff model applied in the plain area[J]. Haihe Water Resources, 1987(5): 6-12. (in Chinese))
- [57] MARTINEZ C J, CAMPBELL K L, ANNABLE M D, et al. An object-oriented hydrologic model for humid, shallow water-table environments[J]. Journal of Hydrology, 2008, 351: 368-381.
- [58] SCHULZE R E, MARTINEZ C J, KIKER G A, et al. A Javs-based, object-oriented modeling system for southern african hydrology[J]. Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers, 2006, 49(5): 1419-1433.
- [59] YAN Renhua, GAO Junfeng, HUANG Jiacong. WALRUS-paddy model for simulating the hydrological processes of lowland polders with paddy fields and pumping stations[J]. Agr Water Manage, 2016, 169:148-161.
- [60] 张永勇,夏军,程绪水,等. 多闸坝流域水文环境效应研究及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011: 214.
- [61] CARLUER N, MARSILY GD. Assessment and modelling of the influence of man-made networks on the hydrology of a small watershed: implications for fast flow components, water quality and landscape management[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285 (1/2/3/4): 76-95.
- [62] TIEMEYER B, MOUSSA R, LENNARTZ B, et al. MHYDAS-DRAIN: a spatially distributed model for small, artificially drained lowland catchments[J]. Ecological Modelling, 2007, 209(1): 2-20.
- [63] FAN Ying, LI Hongbin, MIGUEZ-MACHO G. Global patterns of groundwater table depth[J]. Science, 2013, 339: 940-943.
- [64] 宫兆宁,宫辉力,邓伟,等. 浅埋条件下地下水-土壤-植物-大气连续体中水分运移研究综述[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊 1): 365-373. (GONG Zhaoning, GONG Huili, DENG Wei, et al. An overview of water movement in groundwater-soil-plant-atmosphere continuum with shallow water table[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25 (Sup1): 365-373. (in Chinese))
- [65] DOBLE R C, SIMMONS C T, WALKER G R. Using MODFLOW 2000 to model ET and recharge for shallow ground water problems[J]. Groundwater, 2009, 47(1): 129-135.
- [66] FURMAN A. Modeling coupled surface-subsurface flow processes: a review[J]. Vadose Zone J, 2008, 7(2): 741-756.
- [67] APPELS W M, BOGAART P W, SJOERD E, et al. Surface runoff in flat terrain: How field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity[J]. Journal of Hydrology, 2016, 534:493-504.
- [68] GUO Hongyan, ZHU Jianguo, WANG Xuerui, et al. Case study on nitrogen and phosphorus emissions from Paddy field in Taihu Region[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2): 209-219.
- [69] GERMAN P, LEVY B. Groundwater response to precipitation[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1986, 67 (8): 91.
- [70] KUBOTA J, SIVAPALAN M. Towards a catchment-scale model of subsurface runoff generation based on synthesis of small-scale process-based modelling and field studies[J]. Hydrological Processes, 1995, 9(5/6): 541-554.
- [71] 孟济元. 金坛县志[M]. 南京:江苏人民出版社, 1993: 901.
- [72] HOPMANS J W, PASTERNAK G. Experimental hydrology: a bright future[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(2): 117-120.
- [73] KIRKBY M J, EVANS D J A. Hillslope geomorphology[M]. Routledge: Taylor Francis Ltd., 2004: 633.
- [74] DUNNE T. Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65(1/2/3): 25-48.
- [75] SEIBERT J, MCDONNELL J J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft data for multicriteria model calibration[J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1241.
- [76] 韩小乐,刘金涛,张文平. 变化环境下流域水文实验的发展述评[J]. 水资源研究, 2014, 3(3):240-246. (HAN Xiaole, LIU Jintao, ZHANG Wenping. A review on the advances in catchment hydrological experiments under changing environment [J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 3(3): 240-246. (in Chinese))

(收稿日期:2017-01-09 编辑:高建群)