

# 国内外实验小流域水科学研究综述

付丛生, 陈建耀, 曾松青, 蒋华波, 董林垚

(中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

**摘 要:**在回顾和分析小流域/实验小流域相关概念和内涵的基础上,对国内外实验小流域的发展历程、研究现状进行了综述。对中国现存及历史时期存在过的实验小流域做了统计,依流域概念、研究内容进行分类,并对国内外的实验小流域研究做了比较。在此基础上,针对目前实验小流域研究中存在的不足之处,对未来相关研究提出了建议,以期对中国未来的实验小流域研究有所启示。

**关 键 词:**实验小流域;发展历程;综述

在当前中国社会经济迅速发展、全球气候变化和人类活动影响加剧的背景下,基础研究薄弱已影响到中国水文科技的发展。加强水文基础研究,建立水文科学实验平台是目前中国水文科技发展的基本思路之一<sup>[1]</sup>。

小流域的水循环过程完整,但空间尺度相对较小,可以获得水循环过程的原型观测数据。实验小流域是研究水文、水资源、水环境的理想对象,是探索变化环境下水文、水资源及水环境系统演变规律,寻找水资源可持续利用方法的重要手段。二战之后,不同国家建立了为数众多的实验小流域,用来进行各种各样的观测。实验小流域水文研究自“国际水文十年计划(1965-1974)”始,一直是“国际水文计划(International Hydrological Programme, IHP)”的组成部分。一个国际水文研究计划几十年来一直关注着该主题,足以说明实验小流域研究的重要性。

在中国期刊全文数据库中(<http://dlib3.cnki.net/kns50>, 1979-2010),以“实验(试验)小流域”为题名检索词,只检索到1条记录;以“实验小流域”为主题检索词,共检索到7条记录,均为期刊文章,5篇是关于水土保持的;在科学引文索引(Science Citation Index, SCI)中(<http://isiknowledge.com>, 1979-2010),以“experimental basin (watershed)”为篇名检索词,可检索到113条记录。由以上实验小流域相关的中

外文献检索结果可以看出,国内实验小流域的研究相对国外较少,主要集中在水土保持方面。

## 1 相关概念

### 1.1 小流域

目前,国内外关于小流域的概念尚无统一标准,不同的学者、单位或组织从不同的角度给出了不同的概念。

(1) 规划的角度。王忠法<sup>[2]</sup>将小流域定义为流域面积小于1000 km<sup>2</sup>或河道基本上在一个县属范围内的流域;卢剑波和王兆骞<sup>[3]</sup>认为“以分水岭为界,以小溪为地貌特征的一个集水区域”称为小流域,小流域是一个水文单元,又是一个自然生物单元,同时还是一个社会经济政治单元,是一个资源管理和规划的综合单元;王立良<sup>[4]</sup>认为小流域是指在水力侵蚀地区,以天然沟壑及其两侧山坡形成的闭合集水区。每个小流域既是一个独立的水土流失单元,又是发展农林牧各业的经济单元。

(2) 水土保持和生态环境保护的角度。陈良<sup>[5]</sup>认为所谓小流域是指相当于由一条坳沟或河沟沟道为主体所构成的,以分水岭和出口断面为界的一个独立而完整的自然集水区域,是山地和丘陵区的基本地貌组合单元。小流域范围一般较小,其面积往往在3~50 km<sup>2</sup>之间;郭廷辅和段巧甫<sup>[6]</sup>将小流域

收稿日期:2010-10; 修订日期:2011-01.

基金项目:广东省自然科学基金项目(9251027501000021);国家自然科学基金项目(40571027);中山大学后备重点课题项目(2008-2009)和广东水利科技创新与推广项目(2009年度)。

作者简介:付丛生(1982-),男,山东泰安人,博士,研究方向为人类活动影响下的流域水循环系统。

E-mail: anlexiaoming@163.com

通讯作者:陈建耀(1966-),男,福建仙游人,教授,研究方向为水资源、水环境。E-mail: chenjiyao@mail.sysu.edu.cn

定义为流域面积为 $5 \sim 30 \text{ km}^2$ 的闭合集水区,它既是降雨径流汇集的最小单元,又是水土流失发生发展过程和大江大河产水产沙的最小单元;陆鼎言<sup>[7]</sup>认为小流域通常是指二、三级支流以下以分水岭和下游河道出口断面为界集水面积在 $100 \text{ km}^2$ 以下的相对独立和封闭的自然汇水区域;韦洁诚等<sup>[8]</sup>所定义的小流域是指一个完整的集雨面或集流区域,是一个将径流汇到一个共同点的自然单位;代全厚<sup>[9]</sup>认为小流域是具有独立系统功能和性质的自然地理单元,是产流产沙的基本单元,也是中国山区水土流失治理的基本单元。

(3) 面积角度。美国把面积在 $1000 \text{ km}^2$ 以下的流域称为小流域,欧洲和日本把面积在 $50 \sim 100 \text{ km}^2$ 以下的流域称为小流域,或荒溪流域、山洪流域(Torrential Watershed),中国把面积在 $3 \sim 50 \text{ km}^2$ 间的闭合汇流区称为小流域<sup>[10]</sup>。根据水利部规定,中国目前水土保持工作中的小流域概念,是指面积小于 $50 \text{ km}^2$ 的流域。李妍彬<sup>[11]</sup>则对小流域的概念做了一定的总结,认为:流域,在地理学上,一般解释为相对河流的某一断面的,由分水线包围的区域;在流域经济学中,是指水资源的地面集水区和地下集水区的总称。中国习惯上把面积超过 $20 \text{ 万 km}^2$ 的长江、黄河、松花江、辽河、珠江、淮河、海河等7大流域看作是大流域。小流域是相对于大流域而言的,各专业领域提法有别,水保上一般指一个完整的土壤侵蚀单元;水文学上把级别最高的支流称为小流域;而流域经济学把大河的支流流域称为小流域。

本文从水文学、水资源、水环境的角度考虑,认为小流域需满足两个条件:① 闭合。小流域需是由分水线包围的、完整的集水区域;② 面积不应太大。 $\leq 1000 \text{ km}^2$ 是一个比较合适的范围。

## 1.2 实验小流域

实验小流域是水科学实验研究的一种途径,是探索水文、物质循环现象物理过程和形成机制的一种有效方法。顾慰祖和吴学鹏<sup>[12]</sup>认为实验流域一般要具备以下基本条件:① 有适于研究目的的自然地理条件;② 除研究岩溶地区径流等特殊情况下,要选择闭合流域;③ 流域面积不宜过大(一般在几平方公里以内);④ 有良好的水文控制和观测条件。本文将实验小流域定义为“设置安装了观测仪器、范围小于或等于 $1000 \text{ km}^2$ ”的小流域;实验小流域与小流域的区别在于前者具有良好的可控条件。

## 2 国外实验小流域发展及研究现状

### 2.1 发展历程

国际上系统的小流域水文实验研究始于20世纪30年代,1933年苏联建立瓦尔达依(Валдай)水文科学研究实验站,美国1934年改建了科威塔(Coweeta)水文实验站<sup>[13]</sup>。1965-1974年的国际水文十年科学计划(International Hydrological Programme, IHP)提出了代表流域和实验流域概念并成立了专门的工作组,之后的国际水文计划(IHP)也十分关注实验小流域,此极大促进了各国小流域水文实验研究的发展<sup>[14]</sup>。目前,许多实验小流域研究已加入区域性的“IHP-FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data)”计划,例如EURO FRIEND Project 5-Catchment Hydrological and Biogeochemical Processes in a Changing Environment,以及MED FRIEND<sup>[15]</sup>等。

### 2.2 主要研究内容

(1) 小流域水循环过程研究。人们在小流域尺度上开展最早、研究最多的就是水循环过程。在水循环过程中,“雨水、地表水、土壤水、地下水”在进行着相互转化及周而复始的水循环运动。当前小流域的研究内容几乎涵盖了水循环过程中降雨、截留、蒸发、下渗、径流等所有环节,且水循环各个环节之间的联系,也即“界面(Interface)”成了研究热点,例如土壤-植被-大气相互作用(Soil-vegetation-atmosphere Interactions)<sup>[16]</sup>、地表-地下水的相互作用<sup>[17]</sup>等;此外,气候变化<sup>[18]</sup>、人类活动<sup>[19]</sup>对流域水循环过程的影响以及无资料地区水文预报研究(PUB)<sup>[20]</sup>等在近10~20年也成研究热点。由于滨海实验流域少,小流域中海水与地下水的相互作用研究尚不多。

(2) 小流域水环境研究。小流域水环境研究中主要涉及雨水、河水<sup>[21]</sup>、地下水(泉水)<sup>[22]</sup>,最常见的监测项目包括T(温度)、pH、EC(电导)、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ <sup>[23]</sup>等,部分监测项目还包括重金属及D、 $^{18}\text{O}$ 、 $^{222}\text{Rn}$ <sup>[24]</sup>等同位素。研究目的主要是分析水体水环境的时空变化、影响因素和治理措施等。由于水体富营养化现象普遍存在,面源污染的机理、营养物迁移转化规律的研究日益增多。

(3) 土壤侵蚀、泥沙运动及泥石流研究。土壤侵蚀和泥沙运动研究工作主要服务于水土保持和生态修复。其中泥沙分为溶解质(Dissolution)、悬

移质(Suspension)、推移质(Bed Load)<sup>[25]</sup>,受关注程度由低到高为推移质→悬移质→溶解质。测量难度的顺序与之相反。在小流域尺度上推移质的研究成果相对较少,一般采用间接方法测定相应参数。

由于泥石流的破坏性极大,小流域尺度上的相关研究也不少<sup>[26]</sup>。

### 2.3 观测研究

随着科技进步和经济发展,小流域的水文过程与水分/物质循环的野外观测更加细化,观测方法、手段也不断进步。

在小流域水循环的观测方面,值得关注的是有关土壤含水量测定的进展。土壤水联系着地表水与地下水,与降雨入渗、潜水蒸发等地表、地下水文过程关系密切,是地表地下水相互作用研究的重要组成部分。在缺乏野外实测资料时,人们通常利用假定模式模拟研究土壤含水量<sup>[27]</sup>。随着中子仪法、Time-domain Reflectometer-TDR 等方法的逐步完善,大密度、高频率的小流域土壤含水量观测成为可能。观测技术的提高使相关研究内容更为深入:土壤含水量的时空分布特点、类型;土壤含水量的影响因素,如地形、土壤结构、土地利用、气候变化等<sup>[28]</sup>;土壤含水量对其它水文要素的影响<sup>[29]</sup>等。

### 2.4 模拟研究

建立在野外观测数据基础上的模拟研究有助于更深入理解现象、过程与机理。基于长期积累的监测数据,已研发众多的小流域尺度的水文模型,用于科学研究与生产实践。模拟研究已成为小流域研究的重要组成部分。

小流域模拟研究的内容和特点可从内涵、外延和方法3个层面归纳和概括:

(1) 模型内涵。模型模拟的内容可以概括为以下几个方面:水循环过程模拟(一个或多个子过程)、水环境和水生态模拟、土壤侵蚀模拟。目前模拟研究基本上涉及水循环各个环节,例如,降雨<sup>[30]</sup>、蒸散发<sup>[31]</sup>、土壤水的运动<sup>[32]</sup>、地下水运动<sup>[33]</sup>、径流模拟<sup>[34]</sup>以及最普遍、最传统的暴雨洪水的模拟<sup>[35]</sup>等;营养物质的模拟研究,例如氮<sup>[36]</sup>、磷<sup>[37]</sup>等受关注度很高;同时在小流域模拟中也出现了微生物过程模拟<sup>[38]</sup>的研究;泥沙运动<sup>[39]</sup>和水土流失<sup>[40]</sup>模拟研究主要运用于水土流失严重的地区。

(2) 模型外延。数目繁多新模型不断出现<sup>[41]</sup>;现有较成熟模型应用<sup>[42]</sup>、改进<sup>[43]</sup>、参数率定研究<sup>[44]</sup>、模型区域化研究<sup>[45]</sup>、参数敏感性分析<sup>[46]</sup>和不确定性

研究<sup>[47]</sup>等更是数不胜数。

(3) 研究方法。随着观测技术、计算机技术的发展,以及实验数据的积累,更细化的土壤含水量、土水势、水力传导度<sup>[48]</sup>、氧化还原<sup>[49]</sup>等物理、化学数据及GIS<sup>[50]</sup>、RS<sup>[51]</sup>、示踪剂<sup>[52]</sup>、同位素等手段均被应用到小流域模拟研究中;同时,将同一模型应用于不同流域<sup>[53]</sup>,及在同一流域使用不同模型或不同的模拟模块来降低模拟的不确定性,也变得较容易。

在众多小流域模拟研究中,气候变化<sup>[54]</sup>、人类活动(例如土地利用变化、水资源开发利用、污水排放等)对水文水环境的影响,以及无资料地区的水文预报“PUB”研究等等都是当前的热门。

## 3 国内实验小流域发展及研究现状

### 3.1 发展历程

中国系统的小流域水文实验研究开始于20世纪50年代,1953年原治淮委员会为了研究平原区除涝排水标准,在安徽淮北平原北淝河和濉河之间的青沟及沱河上游的小黄河、河南颍河上游的汾河,分别设立了不同标准的排水实验站。后来保留了具有不同流域面积和多种排水条件的青沟站及其分站五道沟站,又由于青沟站的小流域屡遭人为破坏,最终只保留了五道沟径流实验站,即目前的五道沟水文水资源实验站<sup>[55]</sup>。因此可以认为1953年是新中国小流域水文实验研究的开始。此后,由于各种社会、政治、经济因素的影响,中国实验小流域(作为水文实验站的一种)的发展开始了曲折前进的过程,其主要发展历程<sup>[56]</sup>可分为以下4个阶段:

(1) 1956-1966年发展阶段。1956-1958年,因小河暴雨洪水水文计算的需要,加上当时水利部水文局也颁发了《全国径流实验站网规划(草案)》<sup>[57]</sup>,在许多省、区设立了中国第一批广泛分布于全国主要气候区、水文区的径流实验站<sup>[14]</sup>,主要包括3种类型:径流站、径流实验站和野外水文实验基地,其中不少径流实验站和野外水文实验基地就是实验小流域。1956-1966年是中国实验小流域研究发展的黄金时代。

(2) 1966-1978年倒退阶段。1966-1978年野外实验小流域在“文化大革命”期间遭到了灭顶之灾,许多高水平的实验小流域,如长办凯江、祁仪<sup>[58]</sup>、黄委子洲<sup>[59]</sup>等,毁于一旦。



(3) 1978-2006 年基本停滞阶段。1978 年水利电力部水管司水文处通过《全国径流实验经验交流会》,采取一系列措施,恢复、重建、新建了一批站,力图使径流实验事业重新发展;1986 年水利电力部水文局进行了一次全国水文实验调查,试图推动它在新条件下能有新的发展<sup>[60]</sup>。但市场经济的发展促进了科研体制的改革,流域水文系统的径流实验站缺乏正常的实验研究经费,该阶段实验小流域并未得到明显发展。

(4) 2006 年至今重新发展阶段。为加强水文实验站的建设与管理,水利部水文局 2006 年发文(水文科[2006]90 号),对全国“各流域机构水文局(处),各省、自治区、直辖市水文(水资源)(勘测)局(总站),有关高校、科研单位”进行了水文实验站调查。目前,水文实验站工作已得到了水利部领导和有关部门的高度重视,水文实验站规划工作已正式启动,不少实验小流域的建设也纳入了规划当中。

### 3.2 国内实验小流域统计

本文对中国现存及历史时期存在过的实验小流域做了统计,共统计到 18 个。2000 年之前建设的实验小流域大多已经遭到严重破坏或因缺乏实验经费而停测,目前仍在发挥着实验功能的仅有五道沟、滁州等少数几个。

(1) 从流域角度考虑实验小流域的区域分布。辽河流域有叶柏寿站;海河流域有西台峪、坡底、东台沟;黄河流域有子洲、皇甫川长滩水沙实验站、神木六道沟、皇甫川水土保持试验站;淮河流域有青沟、五道沟、城西、滁州;长江流域有祁仪、凯江、蒋家沟;太湖流域有姜湾;珠江流域有中山大学滨海水循环综合试验基地;内陆河流域有乌鲁木齐河山区流域等。其中,中山大学滨海水循环综合试验基地是统计到的 18 个实验小流域中唯一一个属于滨海的实验小流域。

(2) 实验小流域的实验内容方面。排水实验有青沟<sup>[61]</sup>;降雨径流关系或四水转化有五道沟<sup>[62]</sup>、姜湾<sup>[63]</sup>、乌鲁木齐河<sup>[64]</sup>、叶柏寿<sup>[65]</sup>、城西<sup>[66]</sup>、滁州<sup>[67]</sup>、东台沟<sup>[68-69]</sup>、中山大学滨海水循环试验基地<sup>[70]</sup>;水土流失或泥石流有子洲<sup>[71]</sup>、西台峪<sup>[72]</sup>、坡底<sup>[73]</sup>、皇甫川长滩水沙实验站、神木六道沟<sup>[74]</sup>、蒋家沟<sup>[75]</sup>、皇甫川水土保持试验站<sup>[76]</sup>;人类活动和气候变化相关有祁仪、凯江、东台沟;面源污染有五道沟、中山大学滨海水循环试验基地<sup>[77-78]</sup>。

由上述实验流域的实验内容分析可以看出,中

国实验流域的主要研究内容是降雨径流关系、四水转化和水土流失;另外,面源污染、人类活动和气候变化的水文效应等研究也开始受重视。中国试验小流域的具体位置、主要流域特点等见表 1。

## 4 国内外研究对比

1966 年之前,中国野外实验小流域研究在世界上“本不甚落后而且还有其特点”<sup>[20]</sup>,但由于文革的原因及接下来市场经济浪潮对水文基础研究的冲击,目前中国的野外流域研究相对于其他一些国家,尤其是相对于很多欧洲国家,已落后不少。

(1) 观测数据的连贯性。20 世纪 50、60 年代中国设立的实验流域中,仅有五道沟实验站的资料系列未间断。尽管小流域水文要素的长期观测相对于大流域困难很多,但在欧洲还是有不少国家的实验小流域具有相当长的连续观测资料<sup>[15]</sup>,例如波兰“Zagożdżonka”小流域的径流观测从 1963 年开始未间断;捷克的“Červík”、“Malá Ráztoka”两个小流域自 1953 年开始观测降雨、径流,至今观测时间接近 60 年,此外,Válek 自 1927 年起对两个 4 km<sup>2</sup>小流域进行森林水文研究直至 1955 年,1955 年后由波兰一个水文气象研究所继续观测至今;斯洛伐克“Bela”小流域(93.5 km<sup>2</sup>)降雨、径流的连续观测资料从 1928 年至今;德国的“Schäfertal”小流域(1.44 km<sup>2</sup>)的降雨、径流观测自 1968 年至今未间断,“Lange Bramke”小流域(0.76 km<sup>2</sup>)和“Wintertal”小流域(0.77 km<sup>2</sup>)降雨、径流、积雪厚度的监测自 1948 年开始至今未间断,“Dicke Bramke”小流域(0.32 km<sup>2</sup>)和“Stelie Bramke”小流域(0.38 km<sup>2</sup>)降雨、径流、积雪厚度的连续监测分别开始于 1951 年和 1952 年。

(2) 观测的系统性及数据质量。以上文中提到的德国“Lange Bramke”实验小流域为例进行说明。该小流域观测始于 1948 年,观测的项目非常系统,具体包括降雨、径流、基岩裂隙水水位、泉水流量、泉水中的萘磺酸钠浓度、溪流中的各种离子浓度;Plot 尺度上的气象要素(气温、湿度、辐射、风速风向)、空气中“SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>”的浓度、大气沉降、土壤水中各项离子浓度等。

“Lange Bramke”实验小流域中许多数据的监测质量很高,例如“Lange Bramke”和“Wintertal”、“Dicke Bramke”、“Stelie Bramke”4 个小流域的面积总和为 2.23 km<sup>2</sup>,总的雨量筒的数量却多达 31 个;

表1 中国实验小流域不完全统计表  
Tab.1 Experimental catchments in China

站名	位置	面积/km <sup>2</sup>	流域特点	主要试验目的、试验内容	备注
青沟径流实验站	安徽省淮北坡水区	-	地处坡水区, 地下水埋深浅, 垂向水循环在水循环过程中占有重要地位	平原区除涝排水水文问题	新中国水文流域研究的开始; 屡遭破坏, 已不存在
五道沟实验站	安徽省固镇县新马桥乡	1.36	地处平原区, 流域坡度较缓, 地下水埋深浅, 垂向水循环在水循环过程中占有重要地位	平原区“三水”转化关系	新中国水文流域研究的开始; 数据资料系列最完整
姜湾水文实验站	浙江省德清县筏头姜湾	20.9	地处山丘区, 流域地形总体起伏较大, 平均坡度为 33%	山丘区暴雨径流关系及其计算方法	为研制新安江模型提供了重要资料; 目前已停测
乌鲁木齐河山区流域	新疆维吾尔自治区天山中段北坡	924 (英雄桥控制站)	属西北干旱区内陆河山区流域	西北干旱区内陆河山区流域的径流形成	-
子洲径流试验站	陕北大理河的支沟岔巴沟上	-	-	水土流失	-
叶柏寿径流试验站	辽宁省朝阳市建平县叶柏寿镇	北沟: 1.95 ; 卧虎沟: 0.45	地处辽西半干旱的低山丘陵地区	半干旱地区和丘陵山区的小汇水面积暴雨径流; 人类活动对径流的影响	-
祁仪径流实验站	河南省唐河县祁仪乡	-	-	暴雨径流关系; 降雨径流形成的物理过程实验; 人类活动对降雨径流的影响	文革期间已遭“灭顶之灾”
凯江径流试验站	四川省	-	-	长江三峡以上区域水利化对径流的影响	当时 (1959) 中国规模最大的径流实验基地
西台峪站	河北临城县石城乡	127	河北省南部太行山区, 植被较好	土壤侵蚀	-
城西径流实验站	安徽省滁州市施集镇	821	安徽省滁州市的浅山区	浅山区流域径流形原理规律	目前已停测, 待恢复
坡底小流域	河北邢台县西部山区城计头乡	283	河北省南部太行山区, 植被度不高	土壤侵蚀	-
滁州水文实验基地	安徽省滁州市	-	-	径流组成、降雨径流关系、产流方式等	-
东台沟实验基地	北京市怀柔区	0.64	位于华北地区中北部燕山山脉, 属华北石质丘陵地区	“土壤-植被-大气”界面过程、坡地水土过程、流域水循环过程及其相互联系, 半干旱半湿润山区水量转化及水循环变化机理, 人类活动和气候变化的水文效应	-
中山大学滨海水循环综合试验基地	广东省珠海市	3.4	地处珠江三角洲滨海地区	雨水、地表水、土壤水、地下水、海水的水分相互转化与物质迁移	华南地区唯一完整的实验小流域; 全国实验小流域中唯一滨海的
神木六道沟流域	陕西省神木县	6.89	地处黄土高原水蚀风蚀交错带	土壤水蚀、土壤风蚀	-
蒋家沟流域	云南省昆明市东川区	48.5	位于云贵高原北部的小江流域, 是世界上著名的泥石流沟, 被誉为“泥石流的天然博物馆”	滑坡、泥石流	-
五分地沟小流域	内蒙古自治区准格尔旗	4.0	沟壑纵横, 支离破碎的丘陵沟壑地貌; 属典型温带半干旱气候区	水土流失、土壤侵蚀、植被生态需水	20 多年前水土流失强烈

“Lange Bramke”小流域内设置了21口不同深度的观测井, 大部分观测井的观测时段长达30年(1987-2007), 观测频率为每天一次; 大气沉降中N、S通量、土壤水及小流域溪水中NO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub>的浓度的连续监测时段均达到30-40年; 此外, 为了研究该小流域地表地下水的相互转化, 1954-2007年每年均进行氡同位素示踪实验, 实验连续54年。因资金

不足、重视程度不够等原因, 目前国内实验流域的观测水平尚不能与“Lange Bramke”等小流域相比。  
(3) 观测标准的统一性。因为欧洲不同的实验小流域有时会属于同一研究项目, 因此实验小流域的观测项目、观测频率、观测时段长度等可能会有统一的标准, 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还未能达到统一相关

观测标准。

## 5 不足与展望

### 5.1 不足

目前,国内外实验小流域研究还存在诸多不足,主要表现在观测质量与机理研究两个方面:

(1) 观测质量有待提高。众所周知,因观测条件艰苦、观测仪器抵御恶劣天气(例如台风)的能力差、维护费用高等原因,小流域的长期维护相比大流域更加困难;实验小流域观测的系统性、观测标准的统一性等方面也有待改进。此外,各国实验小流域的观测水平参差不齐,而不同国家和地区的小流域往往代表着不同的气候类型和植被、地质条件(土壤、基岩等),观测水平的差异不利于不同类型小流域间的对比分析,小流域研究的系统性有待完善。只有当实验小流域的研究样本质量足够高、类型足够丰富时,小流域的水科学机理研究才能更好地服务于“大尺度水文研究”、“无资料地区的水文预报”等相关研究。

(2) 机理研究尚需加强。实验小流域在水文、水资源、水环境的机理研究方面还有不少工作要做。例如,在水文机理研究中的界面水文过程研究方面,人们对地表水-地下水相互作用的认识还不够透彻。在地表水的研究中经常忽略地下水或仅做简单处理,在地下水的研究中往往对地表水做简单处理;且目前关于地表水-地下水相互作用的观测和研究手段还不够成熟,导致不同方法得到的机理过程有异甚至自相矛盾,如利用化学分割方法求出的“地下水对洪水过程的贡献”与水力学方法的计算结果经常是矛盾。因此,实验小流域在水科学机理研究方面尚需加强,机理研究最能体现实验小流域研究的价值。

### 5.2 展望

经过二战后几十年的发展,作为水科学基础研究的实验小流域研究,为水循环机理研究及“气候变化、人类活动对水文、水资源、水环境影响”的相关研究提供了一定的理论基础。本文认为未来的实验小流域研究应在以下几个方面有所加强:

(1) 不同区域、不同类型实验小流域的对比研究。不同区域小流域的水文、物质循环过程各有其特点。如滨海、滨湖流域与内陆流域相比,其水文、

物质循环过程影响因素更多、更为复杂;此外,不同区域的气象、植被、土壤、地质条件不尽相同,相应的水文、物质循环过程存在差异。只有真正理解不同类型小流域的水分与物质循环过程,才有可能详细了解“通常具有较大内部差异性”的大尺度过程。

(2) 实验小流域研究的综合性。任一流域中至少包括“大气-土壤”、“土壤-岩石”、“土壤-水体”、“岩石-水体”等界面,其界面间的水分、物质循环过程多种多样,要全面、彻底的了解流域的水与物质循环过程需要从机理上有机地把各界面过程串联起来,使小流域的水/物质循环研究成为一个整体。目前对水与物质循环过程的研究多侧重于某一界面或某一过程,综合分析尚不多见。界面过程同样复杂,尺度不大、可进行原型观测的实验小流域是综合分析水与物质循环过程的一个理想对象。此外,海陆交互过程中的水分与物质传输极大影响近岸生态环境及河口海岸的演化,在我国不同自然地理地带建设滨海水循环试验流域具有十分重要的理论与实践意义。

(3) 不断将新技术、新方法应用于实验小流域研究。由于水文、水资源、水环境系统的复杂性,关于“地表水-地下水的转化”、“营养物质的迁移转化”等复杂问题的研究手段还需进一步加强。未来实验小流域研究中应不断纳入新的研究手段和方法,例如CFCs定年方法、微生物方法等。

(4) 升尺度研究。为大尺度相关研究提供理论基础是实验小流域研究的主要目的之一。要实现为大尺度研究服务必然要涉及升尺度问题,而尺度问题是水文学中研究中的一个难题和重点。升尺度研究是未来实验小流域研究中所必须要加强的部分,例如,如何将小流域的水文研究成果耦合入大尺度水文模型的开发研制中等。

## 参考文献

- [1] 邓坚. 加强水文科技工作 推进水文现代化进程: 为经济社会发展提供全面优质服务[2007-09-14]. <http://www.mwr.gov.cn/ztpd/2007ztbd/zgswkjyeczgclty/zjyh/20070917110011bdb159.aspx>.
- [2] 王忠法. 对小流域规划的几点认识. 水利规划, 1994, 2: 35-38.
- [3] 卢剑波, 王兆骞. GIS支持下的青石山小流域农业生态信息系统(QWAEIS)及其应用研究. 应用生态学报, 2000, 11(5): 703-706.
- [4] 王立良. 发展小流域经济大有可为. 华东森林经理, 2001, 15(1): 60-62.



- [5] 陈良. 低山丘陵区水土保持治理与生态环境效应: 以江苏省盱眙县为例. 长江流域资源与环境, 2004, 13(4): 370-374.
- [6] 郭廷辅, 段巧甫. 径流调控理论是水土保持的精髓: 四论水土保持的特殊性. 中国水土保持, 2001(11): 1-6.
- [7] 陆鼎言. 小流域综合治理开发技术初探. 水土保持通报, 1999, 19(1): 33-37.
- [8] 韦洁诚, 朱泽亮, 李晖, 等. 柳江县开发红壤的途径. 中国农学通报, 1994, 10(5): 45-46.
- [9] 代全厚. 东北低山丘陵区小流域生态经济系统模式及评价[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2003.
- [10] 张金池. 流域农林复合经营类型与技术. 林业科技开发, 1998, 5: 51-54.
- [11] 李妍彬. 北京山区小流域经济开发与管理探讨[D]. 北京: 首都师范大学, 2008.
- [12] 顾慰祖, 吴学鹏. 实验流域 [2008-01-10]. <http://www.chinabaike.com/article/baike/wli/2008/200801101128157.html>.
- [13] 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. 水科学进展, 2003, 14(3): 368-37.
- [14] 水利部水文司. 中国水文志. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 278-281.
- [15] International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins[M]. Goslar-hahnenklee, Federal Republic of Germany, 2009, 3. Ihp&HWRP
- [16] Baudena M, D'Andrea F, Provenzale A. A model for soil-vegetation-atmosphere interactions in water-limited ecosystems. Water Resource Research, DOI: 10.1029/2008WR007172.
- [17] VanderVelde Y, deRooy GH, Torfs PJF. Catchment-scale non-linear groundwater-surface water interactions in densely drained lowland catchments. Hydrology and Earth System Science, 2009, 13(10): 1867-1885.
- [18] Sun G, Amatya D M, McNulty S G, et al. Climate change impacts on the hydrology and productivity of a pine plantation. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(2): 367-374.
- [19] Germer S, Neill C, Vetter T, et al. Implications of long-term land-use change for the hydrology and solute budgets of small catchments in Amazonia. Journal of Hydrology, 2009, 364(3-4): 349-363.
- [20] Sivapalan M, Takeuchi K, Franks SW, et al. IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. Hydrological Sciences Journal / Journal des Sciences Hydrologiques, 2003, 48(6): 857-880.
- [21] McKnight D M, Bencala K E. The Chemistry of Iron, Aluminum, and Dissolved Organic Material in Three Acidic, Metal-Enriched, Mountain Streams, as Controlled by Watershed and in-Stream Processes. Water Resource Research, 1990, 26(12): 3087-3100.
- [22] Gambillara R, Terrana S, Monticelli D, et al. Chemical features of the springs and correlations with faults in north-western area of Como Lake basin (Northern Italy). Proceedings of the "European Geosciences Union General Assembly" Vienna, Austria Center Vienna, Austria, 2005: 24-29.
- [23] Raczak J, Zelazny M. Diurnal fluctuation in stream-water chemical composition in small Carpathian Foothills' catchments (Southern Poland). Proceedings of the "Progress in surface and subsurface water studies at the plot and small basin scale" Turin, Italy, 200-203, October 13-17, 2004.
- [24] Mullinger N J, Pates J M, Binley A M, et al. Controls on the spatial and temporal variability of Rn-222 in riparian groundwater in a lowland Chalk catchment. Journal of Hydrology, 2009, 376(1-2): 58-69.
- [25] Yu G A, Wang Z Y, Zhang K, et al. Effect of incoming sediment on the transport rate of bed load in mountain streams. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(3): 260-273.
- [26] Schlunegger F, Badoux A, McArde B W, et al. Limits of sediment transfer in an alpine debris-flow catchment, Illgraben, Switzerland. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(11-12): 1097-1105.
- [27] Manley R. The soil moisture component of mathematical catchment simulation models. Journal of Hydrology, 1977, 35(3-4): 341-356.
- [28] Chiew F, Whetton P, McMahon T, et al. Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. Journal of Hydrology, 1995, 167(1-4): 121-147.
- [29] Fitzjohn C, Ternan J, Williams A. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. Catena, 1998, 32(1): 55-70.
- [30] Schuurmans J, Bierkens M. Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(2): 677-693.
- [31] Evans J, Jakeman A. Development of a simple, catchment-scale, rainfall evapotranspiration-runoff mode. Environmental Modelling & Software, 1998, 13(3-4): 385-393.
- [32] Croke B, Jakeman A. A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall runoff model. Environmental Modeling & Software, 2004, 19(1): 1-5.
- [33] Molénat J, Gascuel-Oudoux C, Davy P, et al. How to model shallow water-table depth variations: the case of the Kervidy-Naizin catchment, France. Hydrological Processes, 2005, 19(4): 901-920.

- [34] Schuurmans J, Bierkens M. Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(2): 677-693.
- [35] Ludwig R, Taschner S, Mauser W. Modelling floods in the Ammer catchment: limitations and challenges with a coupled meteo-hydrological model approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(6): 833-847.
- [36] Shrestha R, Bárdossy A, Rode M. A hybrid deterministic - fuzzy rule based mode for catchment scale nitrate dynamics. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(1-2): 143-156.
- [37] Daldorph P, Lees M, Wheeler H, et al. Integrated lake and catchment phosphorus model-A eutrophication management tool. I: Model theory. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*, 2001, 15(3): 174-181.
- [38] Haydon S, Deletic A. Model output uncertainty of a coupled pathogen indicator-hydrologic catchment model due to input data uncertainty. *Environmental Modeling & Software*, 2009, 24(3): 322-328.
- [39] Fiener P, Govers G, Oost K. Evaluation of a dynamic multi-class sediment transport model in a catchment under soil conservation agriculture. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(11): 1639-1660.
- [40] Lufafa A, Tenywa M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoriabasin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model. *Agricultural Systems*, 2003, 76(3): 883-894.
- [41] Maréchal D, Holman I. Development and application of a soil classification-based conceptual catchment-scale hydrological model. *Journal of Hydrology*, 2005, 312(1-4): 277-293.
- [42] Hessel R, Tenge A. A pragmatic approach to modelling soil and water conservation measures with a catchment scale erosion model. *Catena*, 2008, 74(2): 119-126.
- [43] Pei T, Liu J, Li J, et al. A modified subsurface stormflow model of hillsides in forest catchment. *Hydrological Processes*, 2005, 19(13): 2609-2624.
- [44] Eckhardt K, Arnold G. Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 2001, 251(1-4): 103-109.
- [45] Merz S, Blöschl G. Regionalisation of catchment model parameter. *Journal of Hydrology*, 2004, 287(1-2): 95-123.
- [46] Francos, Elorza F, Bouraoui F, et al. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 79(2): 205-218.
- [47] Haydon S, Deletic A. Development of a coupled pathogen-hydrologic catchment model. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3-4): 467-480.
- [48] Davis H, Vertessy R, Silberstein R. The sensitivity of a catchment model to soil hydraulic properties obtained by using different measurement techniques. *Hydrological Processes*, 1999, 13(5): 677-688.
- [49] Hansen J, Ernsten V, Refsgaard J, et al. Field scale heterogeneity of redox conditions in till-upscaling to a catchment nitrate model. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(7): 1251-1266.
- [50] Zhang J, Zhuang J, Su J, et al. Development of GIS-based FUSLE model in a Chinese fir forest sub-catchment with a focus on the litter in the Dabie Mountains, China. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2782-2789.
- [51] Immerzeel W W, Gaur A, Zwart S J. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 11-24.
- [52] Thiessen K, Sazykina T, Apostoae A, et al. Model testing using data on <sup>137</sup>Cs from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005, 84(2): 225-244.
- [53] Hörmann G, Zhang X, Fohrer N. Comparison of a simple and a spatially distributed hydrologic model for the simulation of a lowland catchment in Northern Germany. *Ecological Modeling*, 2007, 209(1): 21-28.
- [54] Varanou E, Gkouvatso E, Baltas E, et al. Quantity and Quality Integrated Catchment Modeling under Climate Change with use of Soil and Water Assessment Tool Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(3): 228-254.
- [55] 王振龙, 赵晖. 淮河流域水文实验现状与新时期水资源研究重点. *地下水*, 2009, 31(141): 65-67.
- [56] 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. *中国农村水利水电*, 2007, (8): 13-15.
- [57] 王振龙, 赵晖. 淮河流域水文实验现状与新时期水资源研究重点. *地下水*, 2009, 31(141): 65-67.
- [58] 谢时和, 韩承荣. 水文实验研究[A]. *长江志·水文*. 北京: 中国大百科全书出版社, 2000: 289-341.
- [59] 马秀峰. 对子洲径流实验站分析研究工作的初步总结// 径流实验经验汇编. 1980: 153-171.
- [60] 水利电力部水文局. 全国水文实验调查报告. 1987: 1-19.
- [61] 顾慰祖, 梁士廉. 青沟径流实验站近况. *水文*, 1965, (6): 43-43.
- [62] 高建峰, 于玲. 五道沟地区“三水”转化水文模型. *地下水*, 1996, 18(4): 167-171.
- [63] 顾卫明, 刘金涛. 山丘区小流域地形空间分析及数字信息提取. *水文*, 2009, 29(4): 34-37.
- [64] 施雅风, 康尔泗, 张国威, 等. 乌鲁木齐齐河山区水资源形成和估算. 北京: 科学出版社, 1992.



- [65] 周圣杰, 张俊. 叶柏寿径流实验小流域暴雨产流规律的初步探讨. 水文, 1990, (1): 19-26.
- [66] 何进知, 李舒宝, 张永江, 等. 森林植被对流域产汇流机制的影响效应分析. 水文, 2000, 20(2): 11-13.
- [67] 顾慰祖. 集水区降雨径流响应的环境同位素实验研究. 水科学进展, 1992, 3(4): 246-254.
- [68] 杨聪, 于静洁, 刘昌明, 等. 华北山区坡地产流规律试验研究. 地理学报, 2005, 60(6): 1021-1028.
- [69] Yu J J, Yang C, Liu C M, et al. Slope runoff study in situ using rainfall simulator in mountainous area of North China. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(4): 461-470.
- [70] 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等. 滨海地区潮汐对地下水位变化影响的统计学分析. 水利学报, 2008, 39(12): 1365-1376.
- [71] 王孟楼, 张仁. 陕北岔巴沟流域次暴雨产沙模型的研究. 水土保持学报, 1990, 4(2): 11-18.
- [72] 乔光建, 王春泽, 李哲强. 河北省坡底、西台峪小流域水土流失影响因素分析. 水文, 2008, 28(6): 93-96.
- [73] 乔光建, 檀领革, 陈峨印. 流域植被对减缓土壤侵蚀作用的实验研究. 水资源保护, 2009, 25(3): 52-57.
- [74] 张丽萍, 张登荣, 张锐波, 等. 小流域土壤水蚀强度生态预测模型及实验模拟: 以神木六道沟流域为例. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 55-59.
- [75] 胡明鉴, 张平仓, 汪稔. 降雨对滑坡的激发作用实验研究: 以蒋家沟流域滑坡堆积坡地为例. 水土保持学报, 2001, 15(5): 116-119.
- [76] 杨劼, 高清竹, 李国强, 等. 皇甫川流域几种主要植物水分生态特征. 生态学报, 2004, 24(11): 2387-2394.
- [77] 黎坤. 华南地区坡面溶解氮流失机理及流域非点源负荷解析方法研究[D]. 广东: 中山大学, 2009.
- [78] 黄小兰, 陈建耀, 周世宁, 等. 珠海市海陆交错带水环境原核生物多样性. 应用生态学报, 2010, 21(2): 452-457.

## An Overview on the Water Science Researches at the Experimental Catchments in China and Abroad

FU Congsheng, CHEN Jianyao, ZENG Songqing, JIANG Huabo, DONG Linyao  
(Geography and Planning School, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Based on the review and analysis of the conceptions and connotations of small catchments and experimental catchments, this paper overviewed the development history and research situations of experimental catchments in China and abroad. Survey, measurement and relevant researches at experimental catchments in the world began in the 1930s, and underwent rapid development since the International Hydrological Decade (1965-1974), focusing on the following aspects: hydrological cycling, watershed environment, soil erosion and sediment transportation. In China, small catchment study began in the 1950s, and underwent three development stages of ‘golden stage (1956-1966)’, ‘backward stage (1966-1978)’ and ‘stagnant stage (1978-2006)’. It gets new impetus since 2006 with more funds from the research institutes, universities, and central and local governments. The existent and ever-existed experimental catchments in China have been tabulated according to their main characteristics, research focuses and brief history. Data continuity, systematicity and observation standard at experimental catchment scale have been compared briefly between China and the developed countries, indicating that China is still far behind these developed countries. Further development in experimental catchment in China has been proposed so as to strengthen the comparison study between varied climatic and geographical conditions, and to set up national rules or standards for hydrological observation.

**Key words:** experimental catchment; development history; research focuses; overview; China

本文引用格式:

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. 地理科学进展, 2011, 30(3): 259-267.