

水文科学创新研究进展

主 编 刘昌明

副主编 于静洁 刘苏峡

李丽娟 刘小莽



科学出版社

水文科学创新研究进展

主 编 刘昌明

副主编 于静洁 刘苏峡 李丽娟 刘小莽

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书精选了反映著名水文水资源学家刘昌明院士水文创新学术思想的文章共80篇,包括刘昌明院士及弟子们新近撰写的部分文章46篇和2004年以来已发表的小部分文章34篇。全书共分7个部分。第一部分为综合文章,主要探讨和商榷水科学若干理论与实践问题,综述水文地理的最新进展,以蓝绿水概念辨析中国水资源内涵,探索水资源配置新思路,寻求喀斯特地区的用水新出路,开展水文学思辨,剖析界面水文的研究意义,探讨新形势下水资源管理的适应性对策。第二部分为水循环研究,包括产流、蒸散发、河流潜流带水交换、区域水量变化、水盐平衡、作物水分胁迫和农田水分平衡等内容。第三部分为水文计算与模拟,介绍了刘昌明院士领衔研制的HIMS模型、无测站流域水文预测(PUB)研究方法、大尺度地表径流过程模拟、概率预报建模、参数优选方法和风险分析等。第四部分为水资源研究,展示了在水资源管理中的市场机制、节水型社会评价、水资源承载力、需水量预测的研究成果。第五部分聚焦气候变化与人类活动影响,从河川径流、蒸散发、干燥指数等方面研究了年代气候变异及其对气候变化和人类活动的响应。第六部分为水生态与水环境分析,介绍了我国水污染与饮水安全、生态需水、湿地生态水文等研究成果。第七部分为对水文科学研究的感悟和认识。全书从基础水文学原理、水循环过程、水系统模拟,到水资源管理利用、水对全球变化的响应和水生态、水环境分析,荟萃了刘昌明院士广阔深远的学术思想,涵盖内容丰富,具有极高的珍藏价值。

本书可供广大水文水资源、生态与环境、农林牧等方面的科技人员和高校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水文科学创新研究进展/刘昌明主编. —北京:科学出版社,2014.9

ISBN 978-7-03-041859-3

I. ①水… II. ①刘… III. ①水文学—研究 IV. ①P33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第204769号

责任编辑:朱海燕 李秋艳 吴三保 白 丹 / 责任校对:赵桂芬 郭瑞芝

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年9月第一次印刷 印张:49 1/2

字数:1 200 000

定价:298.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

水是生命之源、生产之要、生态之基。水资源作为基础性的自然资源和战略性的经济资源，对区域发展和国家稳定具有极其重要的意义。新世纪以来，我国水资源供需矛盾愈来愈剧烈，水生态和水环境问题日益突出，水危机已成为严重制约国家生态文明建设和社会经济可持续发展的瓶颈。深入开展水文科学研究，为缓解并最终解决水问题提供科学支撑，是我国水文工作者的历史使命。

水文科学是一门古老而年轻的科学。战国时期，秦国蜀郡太守李冰曾设置“石人”观测水位、掌握水情，修建了著名的都江堰水利工程，福泽万代。新中国成立后，我国一代代科学家披荆斩棘、呕心沥血，为我国水文科学事业的发展和社会经济建设做出了重大贡献。中国科学院在水文科学研究领域一直走在时代的前列。以刘昌明先生为杰出代表的一大批学者长期坚持水文基础科学研究，积累了丰富的科学资料，取得了丰硕的科研成果，培养了大批高素质专业人才，在我国水文水资源科学发展的历史画卷上增添了一道道绚烂的色彩。

刘先生是我国现代水文地理研究的倡导者与开拓者，是当代国际著名的水文水资源学家。他发展了地学方向的水文学和水资源研究，在水循环与水量转换、产汇流模式、比较水文、农业水文、森林水文、生态与环境水文、气候变化和环境水文效应等方面成就卓著；他推动了气候变化与人类活动对水文与水资源影响研究，发展了极具应用价值的稀缺或无资料地区的水文计算及预报方法和模式；他针对黄河断流、华北节水农业、“南水北调”工程环境效应等多个涉水的国家重大需求，开展系统研究，提出了一系列具有重要意义的科学建议，为国家有关部门的决策提供了依据。

虽步入耄耋之年，刘先生仍耕耘不辍，携手后学编撰了《水文科学创新研究进展》一书，以期为新时期国家水文科学研究事业的发展添砖加瓦。该书展示了刘先生及其弟子在综合水文、水循环、水文计算与模拟、水资源、气候变化与人类活动影响、水生态与水环境等研究领域的最新成果，较大程度上反映了刘先生新的学术思想，其出版发行必将极大地促进我国水文水资源科学研究的发展。

仁者乐山，智者乐水。青山不老，绿水长存。适逢刘先生八十华诞，后进谨以此文，恭表祝贺，并遵先生雅嘱，忝为书序。



2014年8月5日

前 言

“淡泊名利，杜绝忽悠；读书万卷，志远万里”，这是刘昌明先生在 2012 年寄赠给每一个同门的箴言，我们把它隽刻在脑海，付之于行动，宣扬于世间。金马之年喜逢先生八十大寿，南山下，东海边，我们无以表达敬爱之情，唯跟随先生，集师从先生的一字一句于此，新撰当前研究进展或选择曾经发表的少数代表性文章，一篇一章，汇集此《水文科学创新研究进展》。由于篇幅与集稿时间限制，本书所载只能反映同门的一小部分研究成果。

本书集地理、工程与地球物理水文研究之精髓，按刘先生倡导的综合、宏微观并重之思想组稿。本书的第一部分取名为“综合”，包括总结水科学理论与实践问题，商榷中国水资源的内涵，综述水文地理研究进展，领会先生从实验水文到水文系统模拟的水文科学思想，开展水文学思辨，思考界面水文的研究意义，探索基于蓝绿水概念的水资源配置和喀斯特地区的用水新出路，探讨核电发展和城市水安全问题，研究中国水资源的管理制度和战略等内容。

刘昌明先生 1965 年在中国科学院地理研究所（中国科学院地理科学与资源研究所前身）建立了中国第一个室内降雨径流形成实验室，21 世纪初又创建了第一个“五水”转化实验系统。探索水文循环原理是先生一生的追求。同门在水循环领域中不断探索，包括：降雨、径流、蒸发、土壤与地下水等，以及大田尺度农田水分平衡与区域尺度的水储量等。所取得的部分进展与成果，是第二部分“水循环”的主要内容。

随着计算机技术的发展，水文学科中水文过程的量化研究也得以突飞猛进，诞生了一系列水文模型，其中由刘先生组织研发的 HIMS 水循环综合模拟系统是分布式模型的新成果之一。迄今，HIMS 系统已在澳、美和国内多个流域得到了应用。特别是 HIMS 系统在资料稀缺地区西藏等地的成功应用，是对国际水文科学协会（IAHS）于 2003 年启动的“无测站流域水文预测（PUB）”计划的重要贡献。对 HIMS 系统研制、应用研究以及相关的概率预报、回归预测、周期性和风险分析的研究是第三部分“水文计算与模拟”的主要内容。

随着全球变化和经济的快速发展，我国水问题突出，水短缺、水污染、水生态、水灾害、水管理五大问题复杂交叉，涉及国家多个方面的安全。同门探索水需求、水市场、水制度、水社会、水价格、水承载、水压力和水安全各个领域，撰写的部分文章纳入第四部分“水资源”中。

气候变化和人类活动对水文水资源的影响，是近年来水文科学的研究热点之一。同门共同努力，开展了包括径流、潜在蒸散发、蒸发皿蒸发、干燥指数等水文要素的时空变化研究，探讨了梯田、林草等土地利用和气候变化对水文过程、水沙关系的影响，这一部分的一些研究汇编入第五部分“气候变化与人类活动影响”。

针对我国的水生态与水环境问题，本书特别关注水污染、饮用水安全和流域水生态安全问题，围绕生态需水研发了生态水力半径法、水量水质、水沙综合评价法。这些荟

萃成了第六部分“水生态与水环境”的内容。

前述论文表达不尽的师生情谊融汇成第七部分的“感悟认识”，但短短的第七部分又如何能载得完、道得全呢？唯有我们一届届同门努力工作，传承与创新，为水文水资源的发展勇往直前，不懈奋斗。

水文科学创新无限，本书反映的是刘昌明先生的主要学术思想，展示的仅仅是先生和同门对水文科学部分领域的研究和探索。本书由刘昌明先生与各位同门共同策划，得到了大家踊跃供稿和积极支持。短期内收集到部分新撰写和已发表的论文 122 篇。因篇幅限制，本书仅收录 80 篇，挂一漏万，恕不能周全。本书的出版不仅缘于各位供稿人的鼎力奉献，更离不开王婷婷为组长，梁康、杨默远、白鹏、赵昕、黄浠、李亚飞、景冰丹、熊丁晖、李艳忠等为成员的书稿收集、排版与校稿组所付出的辛勤劳动。中国科学院地理科学与资源研究所葛全胜所长为本书作序，科学出版社朱海燕编审与李秋艳女士等对本书的编辑出版给予了积极支持，在此一并表示感谢！

刘苏峡 于静洁 李丽娟 刘小莽

2014 年 7 月 22 日

目 录

序 前言

综 合

水科学若干理论与实践问题的探讨与商榷	
刘昌明	3
水文地理学的发展与展望	
何大明 刘昌明 罗 贤	22
基于蓝绿水动态调控的干旱区水资源配置管理新思路	
于静洁 刘昌明	29
核电发展与水资源管理	
陈庆伟 刘昌明	37
国际湿地退化与退化湿地恢复前沿领域研究最新进展	
杨永兴 杨 杨 韩大勇 刘昌明	43
从实验水文到水文系统模拟——刘昌明先生水文科学思想学习的几点认识	
周成虎 刘苏峡 于静洁 宋献方	70
水文学思辨	
陈建耀	77
界面水文研究思考	
刘苏峡	81
自然资源属性与管理体制	
沈大军 余旭东	89
关于我国城市水安全问题的战略思考	
邵益生	96
喀斯特地区绿水利用研究	
杨胜天	100
贯彻落实中央一号文件实行最严格水资源管理制度	
孙雪涛	107
农业灌排体系现代化目标与战略选择	
李宗礼 王修贵 徐春晓 宋 博	111
澳大利亚水量账户系统对中国水权制度建设的借鉴和启示	
刘 卓 柳长顺	120

水 循 环

水循环概论

刘 昌 明	127
华北平原农田生态系统蒸散耗水研究——以禹城站为例	
李发东 刘昌明	151
雅鲁藏布江流域潜在蒸散量计算方法	
付新峰 杨胜天 刘昌明	158
高埋深地下水情况下水盐平衡研究	
孙宏勇 刘昌明 刘小京 曹建生	165
基于地下水位变化计算干旱区潜水蒸发的回顾与展望	
王 平 于静洁 闵雷雷	170
基于温度梯度法的河流潜流带水交换研究	
宋进喜 刘昌明 来文立 杨小刚 王 珍	176
基于 GRACE 数据的区域水量变化研究	
王会肖 王艳阳 王国强 董晴晴	189
华北山区坡地产流规律试验研究	
杨 聪 于静洁 刘昌明 宋献方 胡 堃 李发东 唐常源	201
基于 Bayesian 与 MCMC 分析的径流过程不确定性研究	
王红瑞 高 雄 于 忱	209
夏玉米水分胁迫效应的试验研究	
贾金生 刘昌明 王会肖	228
不同灌溉处理下冬小麦水平衡与灌溉增产效率研究	
裴宏伟 孙宏勇 沈彦俊 刘昌明	234
太行山片麻岩区坡地水文地质特性与渗流集蓄技术研究	
曹建生 刘昌明 张万军	242

水文计算与模拟

HIMS 水循环综合模拟系统研究和应用进展

刘昌明 王中根 刘小莽 桑燕芳 欧阳如琳 刘丽芳 党素珍 张 丹	
梁 康 白 鹏 吴滨滨 李 军 吴梦莹 杨默远 刘文彬 李丹颖	253
西藏稀缺资料地区洪峰流量推求	
刘昌明 白 鹏 巩同梁 王中根 刘小莽	277
无测站流域水文预测 (PUB) 的研究方法	
刘苏峡 刘昌明 赵卫民	288
大尺度地表径流过程模拟和预报的研究趋势探讨	
张永强 周新尧 李红霞	298

华北地区半干旱流域的水文模型及参数优选算法研究	
江 燕 刘昌明 王中根 刘丽芳	312
黄河河源区变化环境下分布式水文模拟	
李道峰 田 英 刘昌明	322
现行普适降水入渗产流模型的比较研究: SCS 与 LCM	
李 军 刘昌明 王中根 梁 康	334
水文时间序列概率预报建模框架研究	
桑燕芳 刘昌明 王中根 杨默远	343
缺水型地区水风险研究	
张士锋 刘晓菲 廖 强 陈俊旭 李九一 王红瑞	353
北京市水资源风险评价的数学模型及应用	
王 颖 马莉媛 王红瑞 刘昌明	363

水 资 源

中国实现水需求零增长的可能性探讨	
刘昌明 赵彦琦	379
我国农村饮水安全问题探讨与对策	
戴向前 刘昌明 李丽娟	389
水资源配置中的市场机制研究	
王冠军	400
关于创新“集体水资源”管理制度的初步思考	
柳长顺	404
节水及节水型社会的分析和对比评价研究	
陈 莹 刘昌明 赵 勇	409
城市雨水利用的成本效益分析研究——以北京市为例	
左建兵 刘昌明 郑红星	417
城市供水价格改革探讨	
周长青	427
区域水资源承载力概念及研究方法的探讨	
段春青 刘昌明 陈晓楠 柳文华 郑红星	432
我国粮食供需区域差异及其对水资源的压力	
王西琴 吕青青	440
黄河流域大型煤炭基地上下游产业链需水量预测	
梁 康	444
高坝大库分层取水措施比选研究	
张士杰 彭文启 刘昌明	456
井灌区节水农业技术集成综合示范节水效益评价——以河北省三河试区为例	
裴 冬 王振华 张喜英 陈素英 胡春胜	464

气候变化与人类活动影响

全球主要河流近百年径流变化的初步探索	
刘昌明 欧阳如琳 傅国斌	473
中国地表潜在蒸散发敏感性的时空特征分析	
刘昌明 张 丹	484
气候暖化与我国的水循环和水资源——过去的趋势及未来预估	
沈彦俊	499
东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性分析	
郑红星 刘 静 刘昌明	504
1960~2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征	
曾 燕 邱新法 刘昌明 潘教大 高 苹	515
黄土高原梯田和林草变化对流域水沙的调控机制	
刘晓燕 杨胜天 刘昌明 王富贵 金双彦	526
黄河源区气候对径流的影响分析	
陈利群 刘昌明 郝芳华 戴 东 刘九五	537
青藏高原三江源区气候变化: 1960~2009	
梁丽乔 李丽娟 刘昌明 兰 措	549
气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响	
胡珊珊 郑红星 刘昌明 于静洁 王中根	573
雅鲁藏布江水资源演变与空间分布特征	
巩同梁	584
基于非线性混合回归模型的潮河流域水资源对气候变化响应分析	
江 燕 刘昌明	593
密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响	
庞靖鹏 刘昌明 徐宗学	603

水生态与水环境

我国水污染状况及其对人类健康的影响与主要对策	
刘昌明 曹英杰	621
近 20 年我国饮用水污染事故分析及防治对策	
李丽娟 梁丽乔 刘昌明 张 丽 姜德娟 李九一	630
基于生态保护目标的生态需水阈值确定研究	
李云成	640
生态水力半径法及其在河道内生态流量计算中的应用	
门宝辉 刘昌明	648

潮白河源区生态流量谱系研究	
戴向前 郑红星 刘昌明 朱芮芮	660
基于二元水循环的河流生态需水水量与水质综合评价方法——以辽河流域为例	
王西琴 刘昌明 张 远	672
基于博弈论综合权重模糊优选模型在地下水环境风险评价中的应用	
黄振芳 刘昌明	683
水沙变异对孟津黄河湿地生态水文的影响及恢复模式研究	
蒋晓辉 王洪铸	691
漳卫南运河流域生态安全时空变化分析	
张晓岚 刘昌明 赵志平 王红瑞	700
筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究	
陈庆伟 刘兰芬 刘昌明	708
遥感与 GIS 支撑下研究流域氮素景观格局对河流生态环境的影响	
赵长森 刘昌明	716
北京市翠湖湿地血红裸藻水华发生的环境条件	
赵欣胜 崔丽娟 李伟 张曼胤 商晓静 张岩	724
柴河水库氮磷污染特征分析与控制措施	
付 青 熊燕娜 吕兴娜	734

水文科学研究的感悟和认识

老师的言传身教激励着我的成长	
于静洁	745
昌明先生，我敬重的导师——写在刘昌明院士八十大寿之际	
孙雪涛	751
五分钱承载的知识价值	
刘苏峡	753
魂牵梦绕家乡水——漫谈我的水文地理梦	
牟海省	768
遥望博格达	
赵卫民	773
水龙吟（外二则）	
李宗礼	775
科学规划合理利用 让中华水塔造福人类——青藏高原考察有感	
吴险峰	776

綜合

水科学若干理论与实践问题的探讨与商榷

刘昌明

(中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘要: 水问题的研究一直是国家最重要的课题之一,关系到社会稳定、民生福祉、经济发展等一系列国家重大需求。笔者从1952年开始从事水文水资源的学习与研究,至今已60年有余。本文主要叙述笔者60多年学习和研究生涯中的一些困惑、思考和初步认识,部分内容并不成熟,希望水文工作者继续努力,将水文学与水资源研究推到新的高度。

关键词: 水文学与水资源;水循环;水文模拟;水生态;气候变化与人类活动

1 面向理论与实际应用的水文水资源研究的3个发展方向

水文学与水资源的基础理论何在?追索过去,早期有人认为水文学是“系数的科学”;20世纪80年代,国际水文科学协会(IAHS)提出水文学缺乏感知(“no perception”);嗣后笔者强调水循环和水平衡是水文学与水资源的基础理论,水循环贯穿并连接了水文学的发展与水资源的开发利用过程。追索历史,水文学的发展涵盖了三个研究方向:历史悠久的地理记述、古代的水利工程和近代的地球物理,这三个方向在水文学发展过程中交叉融合。20世纪后期,水资源问题的研究如火如荼,使得水文水资源的研究与社会经济问题相结合;20世纪末,我国水文学研究则进一步与环境与生态科学结合。这是水文学与水资源研究发展的历程与未来趋势。从学科的基础研究来看,水文学与水资源研究将沿地球物理和地理科学方向发展,后者横跨了自然科学与社会科学的属性。

2 关于地球系统科学中水的研究

20世纪后期,美国科学家提出了地球系统科学观点,当时有两种理解:“①把地球看成一个由相互作用的地核、地幔、岩石圈、水圈、大气圈、冰雪圈和生物圈等组成的系统。这是一种广义的地球系统概念。②把地球看成一个由相互作用的大气圈、水圈、岩石圈和生物圈等组成的系统。这是一种狭义的地球系统概念,也是人们经常使用的地球系统概念。地球系统包含了下部固体地球系统、上部的物理气候系统和全球生态系统,分别控制着水循环、生物地球化学循环和能量循环。这三个循环相互有机地联系成为一个完整的体系,是地球上所有生物生存的空间和活动的场所”。仔细思考,可以看到水循环是一个纽带,具有重要作用。如果说水循环融入地球系统科学,或者说现代水文学要沿地球系统科学方向发展,我认为重要的是水文学需要跨向生物地球化学循环和能量循环的研究。这一重大思想早已被我国的地理学大师黄秉维院士提出,考虑到水文

过程及其相伴的一系列过程集中发生在地球表层，黄秉维院士提出陆地表层系统研究。这为我们水文水资源研究的理论发展指明了道路。

3 关于水文系统方法的应用

1989 年前，中国科学院地理研究所所长黄秉维院士提出了陆地表层系统，同时期，前中国水利水电科学研究院院长谢家泽先生提出了天地生人系统观。国际 IUGG-IAHS 的专业委员会也设立了国际水资源系统委员会 (ICWRS)。当时我们受到了启迪，认为系统论思想是水文科学研究的一个重要途径。作者曾在水文学名词编写中提出了“系统水文学”。基于系统理论研究水文水资源首先是系统理念，即不单纯地用孤立的观点研究某种事物。任何有多因素影响的事物都会被人们作为系统工程来研究，例如笔者在农业节水的研究中构建的农业节水系统等。系统论可以帮助我们完整地建立系统，并将其逐个分解。如下表 1 提供的系统论在水文水资源研究三个方面的应用。

表 1 水文水资源研究中系统方法的应用意义

系统方法应用	系统输入	作用机制	系统输出
分析-鉴别	已知	?	已知
预测-预报	已知	已知	?
反馈-控制	?	已知	已知

由表可见，系统方法可以为系统的输入与输出识别系统的作用，如线性还是非线性的系统作用等等；识别系统后建立定量关系，进而由输入与系统作用可以做出系统的预测与预报等等。此外，识别系统后可以鉴别系统输入对输出的影响，根据输出目标来调节或控制输入。应当指出的是，系统方法实际上在水文水资源研究中早有应用：1957 年纳希(J. E. Nash)基于线性系统推导出著名的纳希瞬时单位线。1972 年，周文德根据水量平衡和蓄泄关系导出了线性水文系统模型。这两个经典的事例说明了笔者归纳表 1 方法的意义。笔者相信，系统论思想在当前与未来的水文水资源研究中必将延续，是水文水资源研究不断创新的驱动力。

4 关于水文研究实验方法的讨论

尽管我们在水文观测数据中不断的分析与探求水文学的某些规律，但是，大自然是一个包含多种因子的复合体与时空千变万化的动态系统，这使得我们在短暂的人生中难以完全探明其产生机制与原因。例如，水文统计中经常采用的水文事件发生频率，一般基于几十年的观测资料去估计百年一遇的水文事件频率分布。这是一种数学理论方法，同时是一种平均的概念，有较大的不确定性。百年一遇的水文事件不是百年非得出现一次；观测的事实往往是，百年一遇的水文事件可能百年内不出现或出现两次，具有一定的随机性，捕获这一稀遇频率事件很不容易。因此，“靠天吃饭”研究稀遇频率水文事件的降水-径流过程非常困难。我们从 20 世纪 60 年代开始，进行了人工模拟降雨的实验，

能随时给出不同强度与历时的降雨。

水文实验的主要功能大致可分为两类：一是分离多种影响因子，探明单一因子与过程的相互作用机制，这往往难以在野外观测中获取；二是比尺模型（沙盘式）的综合实验模拟。这种比尺模型实验在水工与河工实验中早就广泛运用，但是在降雨-径流实验中还没有很好的应用。笔者基于弗鲁德数($Fr=v/(gh)^{0.5}$)与雷诺数($Re=\rho vd/\eta$ ，式中 v 、 ρ 、 η 分别为流体的流速、密度与黏性系数， d 为一特征长度)，推导了降雨-径流实验比尺模型的相似率计算方法。首先，由动力相似可得

$$Fr = \frac{V^2}{gh}, \quad \frac{Fr_{\text{模型}}}{Fr_{\text{原型}}} = \lambda_{Fr} = \frac{V_m^2/gh_m}{V_H^2/gh_H} = 1 \quad (1)$$

式中， Fr 为弗鲁德数； λ 为相似率，下标 H 、 m 分别为原型与模型。相似率计算：

$$\frac{V_m^2}{h_m} = \frac{V_H^2}{h_H}, \quad \frac{V_m^2}{h_m} = \frac{h_m}{h_H} = \lambda_1 \quad (2)$$

1) 推求人工模拟比尺模型的降雨强度($a=1\tau^{-1}$):

$$\frac{a_m}{a_H} = \frac{\lambda_m \times \tau_m^{-1}}{\lambda_H \times \tau_H^{-1}} = \lambda_a \quad (3)$$

$$\lambda_a = \lambda \lambda \times \frac{1}{\lambda_\lambda^{0.5}} = \lambda_\lambda^{0.5} \quad (4)$$

2) 汇流时间(τ):

$$\tau = \frac{1}{V} \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{V}\right)_m = \left(\frac{1}{V}\right)_n, \quad \lambda_\tau = \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_H}\right) \times \frac{V_H}{V_m} \lambda_\lambda \times \frac{1}{\lambda_\lambda^{0.5}} = \lambda_\lambda^{0.5} \quad (6)$$

3) 推求人工模拟比尺模型的产流量(R):

$$R = a \times F \quad (7)$$

式中， F 为面积。

$$\frac{a_m \times F_m}{a_H \times F_H} = \lambda_\lambda^{0.5} \times \lambda_\lambda^2 = \lambda_\lambda^{2.5} \quad (8)$$

需要指出的是第二种实验，即流域降雨径流比尺模型的综合实验，虽然在动力相似计算方面已初步提出了计算方法，但是下垫面的土壤及水分运动比较复杂，目前这种实验主要以定床实验为宜，适用于地表产汇流的动力学机制研究。

实验研究需要室内与野外相结合。1980年开始，我们在山东禹城与河北栾城设置了大型称重式蒸渗仪。2013年在中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室内建立了蒸渗仪，研究“五水转化动力学机制”。在室内外实验中，笔者初步取得了一些成果。例如，基于大型蒸渗仪的测定，在栾城站成功的探明了农田水分耗散的结构，提出了土壤蒸发(E)、农田蒸散发(ET)与土壤表层体积含水量的变化关系：

$$E/ET = 1.157361 + 0.525615(\ln\theta_v) \quad R^2 = 0.9159 \quad (9)$$

式中， θ_v 代表土壤表层体积含水量。这一研究成果在国际杂志 *Agricultural and Forest Meteorology* 发表后已被 36 个国家多次引用，在国内为农业节水实施模式提供了基础参考。

最近,我们正在构建一个三维复杂地表坡面薄层水流运移与入渗过程高精度测试与分析系统。该套系统在室内可控条件下,利用新兴的3D打印技术和微地貌3D成像系统,再现自然界的复杂下垫面;运用高速摄影与有限元多物理场软件,精细观察和模拟坡面薄层水流的流态、流速和流阻;并使用X射线成像系统进行地表以下入渗土壤水分运动的细微定量观测。精确再现产汇流发生、发展的全过程,通过精密测试仪器的使用开展更微观的水循环过程定量研究,能够提高研究精度和水平,用来揭示复杂地表条件下产、汇流物理过程的动力学机制。从微观物理动力学过程出发,精细化再现复杂地表(包括糙率、地形起伏、植物覆盖、土壤类型等要素的差异)条件,研究降雨形成的地表坡面薄层水流运移和动态入渗机制,实现暴雨洪水过程的高精度与精细化模拟。在学科上促进水循环基础理论的发展,使相关水文科学问题上升到更加定量认识的高度。

水文观测和实验是最基础的信息来源。虽然当前大数据(big data)是继云计算(cloud computing)和物联网(the internet of things)之后的信息技术革命,这会对水文水资源的研究产生重大的推进作用,但是不能忽视的是,水文观测与实验数据仍然是有真正价值的一种资产和创新的一个源泉。

5 由“四水转化”到“五水转化”与界面水文学的研究

1966年,澳大利亚科学家菲利普提出的土壤-植物-大气连续体(SPAC)的理论对水文学的发展做出了重大贡献。自然界植物体含有大量的水分,其光合作用下的蒸散在水循环中举足轻重。我们由大气、地表、土壤、地下与植物中5种水分的交换,演绎出52种方式的不同组合,可供研究。

自然界不同相态的水赋存在各自的空间,水分的循环运动与相互交换自然存在一系列的界面。地下水与土壤水通过土层到根系,到植物株体再到叶部,然后从气孔以蒸散的形式与大气交换,其间要通过多个界面。水分通过界面时均有水势与阻力,研究这种过程的机理与调控就是界面水文学。笔者在90年代初期开始了界面水文的相关研究。2000年初在河北省科技厅重大项目的支持下,以节水为目的、以农田为对象,开展了界面节水调控的应用基础研究。界面调控主要从3个界面展开,包括土壤-根系、叶面-大气、土壤-大气的水分过程。经过大量的实验,将蒸散发中的作物生产性蒸散与土壤非生产性蒸发分离,并通过调亏供水的方法控制土壤与根系界面的水分交换。提出了农艺措施与工程措施相结合的理论方案与模式,取得了比较满意的效果,实现了节水100mm、小麦玉米超1000kg的效益。

6 水分与能量(热量)的耦合用于水分的调控

我们基于水量平衡方程与热量平衡方程,提出了辐射干燥指数的水热转化计算,得出的基本公式如下:

$$\frac{R_n}{L \times P} = \frac{1 - \frac{R}{P}}{1 - \frac{H}{R_n} - \frac{G}{R_n}} = \frac{\frac{E}{P}}{1 - \frac{H}{R_n} - \frac{G}{R_n}} = \frac{P - R}{P \left(1 - \frac{H}{R_n} - \frac{G}{R_n} \right)} = \frac{E}{P \left(1 - \frac{H}{R_n} - \frac{G}{R_n} \right)} \quad (10)$$