

水资源与水生态若干工程技术研究述评

严登华^{1,2}, 桑学锋¹, 王浩^{1,2}, 秦大庸^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044; 2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 通过分析研究, 从水循环与水环境监测及分析模拟技术、水循环及水环境调控技术、节水型社会建设与水资源高效利用技术、水资源与水环境管理技术、“数字流域”技术、生态水利技术、水资源评价技术与水资源配置技术等 8 个方面, 对国内外水资源与水生态相关工程技术的发展态势进行述评, 为国内外相关工程技术研究提供参考。

关键词: 水资源; 水生态; 工程技术; 综述

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2007)04-0080-04

Review of some techniques about water resources and hydro-ecology/ /YAN Deng-hua^{1,2}, SANG Xue-feng¹, WANG Hao^{1,2}, QIN Da-yong^{1,2} (1. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. Research Center on Water Resources and Hydro-ecological Techniques of Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on analysis of water cycle and water environment monitoring and simulation technique, water cycle and water environment regulation technique, water saving society construction and high-efficient water resources utilization technique, water resources and water environment management technique, digital watershed technique, ecological water resources technique, water resources evaluation technique, and water resources allocation technique, the development trend of the techniques about water resources and hydro-ecology at home and abroad was reviewed. The result of study may provide some references to the further research in this area.

Key words: water resources; hydro-ecology; engineering technique; review

当前, 洪水灾害、水资源短缺、水污染和水生态退化等与水相关的资源环境问题的并存、频现, 严重制约着全球社会经济的发展与区域的安定团结, 人类正面临着深刻的水危机。国内外水资源开发利用业已经历了原始水利、初级水利、工程水利阶段; 目前正步入资源水利和生态水利阶段。为消除和减缓水危机, 实现可持续发展, 人类对水的认识也正发生深刻的变化, “人与自然和谐”已成为当前国内外水资源开发利用的主题思想; 同时世界范围内的水资源与水生态工程技术也正在上述主题思想的总体框架内取得了新的进展^[1-5]。2006年初, 水利部成立了水资源与水生态工程技术研究中心, 从水循环与水环境监测及分析模拟技术、水循环及水环境调控技术、节水型社会建设与水资源高效利用技术、水资源与水环境管理技术、“数字流域”技术、生态水利技术、水资源评价技术与水资源配置技术等 8 个方面, 开展水资源和水生态工程技术的研发和推广工作。本文结合该工程中心的主要研发领域, 对国内外相关的水资源与水生态

态工程技术发展态势进行述评。

1 水循环与水环境监测及分析模拟技术

从水文工程技术的发展来看, 人类一方面正在革新传统的水文监测技术, 将现代地理信息技术与自动在线技术相结合; 并根据实际需要, 对水循环的各要素过程进行实时动态监测与观测, 同时进行水质水量的联合检测^[6]。另一方面, 人类也正在革新传统的水文分析模拟技术, 水文分析模拟技术已从传统的基于自然过程影响的统计学分析与集总式的水平衡分析, 逐渐过渡到当前基于物理过程、地理信息技术的、多维分布式水文模拟技术^[7]。需要特别指出的是, 为探求自然和人类活动耦合作用的水循环演变机理, 在革新传统基于自然过程的一元演变水循环认知模式的基础上, 进行“自然-人工”二元认知模式下的分布式水循环模拟技术的研制, 并将分布式的水循环模拟技术与集总式的水循环模拟技术耦合, 构成了能系统揭示“自然-人工”二元驱动下的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB403402); 国家自然科学基金(05059056)

作者简介: 严登华(1976—), 男, 安徽太湖人, 高级工程师, 博士, 从事生态水文学与水资源、水环境综合调控研究。E-mail: yandh@iwhr.com

水循环模拟技术^[5]。中国水利水电科学研究院在黄河 973 项目课题中率先研制这项技术,被认为是原创性的研究成果,达到国际领先水平^[8]。未来变化环境下水资源与水环境模拟技术存在以下几方面的发展趋势:①气象-水文过程的耦合模拟,将现代气象和水文观测技术相结合,将气候模式与水文模型相耦合,对突发水文事件进行高精度的模拟与预报;②分布式水文水质过程的耦合模拟,将产污过程和污染物迁移转化过程耦合到水循环的相关要素过程中,从而实现水文及水环境要素的整体模拟;③无观测资料或观测资料缺乏流域的水文预测(PUBs),充分利用遥测技术,对上述地区进行水文预报;④水文水生态过程及其伴生过程的耦合模拟,与水资源评价、水污染以及水生态等专业模型的耦合与集成;⑤模拟模型的公众化、标准化与产品化,固化模拟的前处理和后处理过程,最大限度地降低模拟模型对用户的专业需求,促进模拟模型的公众化、标准化与产品化,充分发挥模拟模型的效益。

2 水循环及水环境调控技术

对水循环进行综合调控,趋利避害,以便最大限度地发挥水资源的自然和社会经济效益。从调控技术的作用尺度来看,除大范围的降水调节外,当前人类有可能对不同尺度上水循环的各要素过程(包括天然水循环过程和人工侧支水循环过程)进行系统的调控^[5]。从天然水循环各要素过程的调控来看,当前的技术措施重点是对通过下垫面的影响或维护,从而改变或维持局部、流域/区域尺度上水循环的产流、汇流和蒸散发过程;为满足区域社会经济的持续发展,人工侧支水循环过程的调控是当前循环调控的关键。人工侧支水循环过程可耦合到天然水循环过程的各个环节,未来的调控更需要从“二元”水循环过程进行综合调控,其中,基于多目标、层次化、群决策的水库调度技术仍是当前和今后一段时期的重要研究命题。从调控措施的类型来看,包括工程和非工程措施;综观国内外的相关研究,当前更注重工程调控措施^[9]。为实现“人与自然”的和谐发展,在进行工程调控时,需要更加关注各类工程措施的综合影响,并最大限度地消除工程措施对区域和流域尺度上的负面和不平衡影响。

就水环境的综合调控而言,主要包括 3 个方面的工程技术措施,首先是消减污染源,最大限度地减少污染物的排放;其次是切断污染传播途径,从而减少污染物的影响范围;第三就是增强接纳水体的水环境承载能力。其中,在当前的国内外相关研究中,第一和第三方面的工程技术措施占主导, Erich

等^[10]将微滤技术应用在浊度为 3~30NTU 石灰水的处理中, Sy Iwia 等^[11]研究运用 PAC/UF 系统大大提高了单独 OF 对有机物去处的效果,李圭白等^[12]研制出的高锰酸钾复合药剂(PPC)具有混凝和有效地去除水中有机物和致突变物的功效。对于第一方面的综合调控而言,一方面需要通过工艺的改进和生活方式的转变,从生产、生活环节的角度减少污染物的排放;其次是通过区域产业布局结构调整,最大限度地减少高负荷污染源,从而从中观和微观尺度减少非污水和污染物的排放;再次,充分利用污水处理措施,开拓中水回用渠道,最大限度地减少废污水对地表和地下水环境的污染。需要指出的是,从污染源的角度进行水环境的综合治理,当前主要侧重于工业企业等点源治理技术,而对于非点源综合治理工程技术的研发相对较为薄弱,我国尤为如此。对于第三方面的工程技术措施而言,当前主要是从污染生态学的角度,通过水域生态系统、河岸带生态系统、人工湿地生态系统等功能性生态建设,提高河流水体的纳污与自净能力^[13]。

需要指出的是,因水质演化往往耦合到水循环的要素过程中,进行水质水量的综合调控是当前和今后一段时期内的重大研究命题。

3 节水型社会建设与水资源高效利用技术

目前世界各国大多已经深刻认识到了节水对于水资源持续利用的战略意义,并开展了相关的研究与实践工作^[14]。美国环保署(EPA)1998年颁布了节水计划导则;斯里兰卡政府在国家水资源战略中突出了以节水为主体内容的水资源需求管理;英国专门根据南北差异,分别制定了以提高用水效率和防污为侧重点的双重节水战略;菲律宾在1997年大旱后,政府专门发起了为期1年的“公众对用水负责”的节水运动;新加坡和日本在节水技术方面尤为先进,节水管理更加强调整经济手段。联合国也积极推动节水意识和技术的普及,2002年联合国亚太地区经济和社会委员会在菲律宾召开了“提高公众节水意识”专题会议。总体看来,国际上在节水单项技术方面取得了一系列突破^[15],在宣传和教育上也有许多创新的做法,但在明确和完整意义上的节水型社会理论和方法研究仍不多见,关键技术研究较为薄弱,相应的技术标准体系尚未建立。我国节水的初期研究多集中在节水工程与节水技术等方面,随着“真实节水”等概念的提出,节水研究深入到资源利用的有效和无效、高效和低效的划分层面,同时加强了节水管理研究。由于节水型社会概念的提出时间不长,专门的节水型社会建设理论研究仍处于起步和探索阶段。当前,我国已经开展

了“点线面”相结合节水型社会建设的试点工作,全国的节水型社会建设工作已经取得了长足的进步。从节水型社会建设的技术支撑体系来看,当前的研究十分薄弱,重点是放在“法制的完善、机制的创新、体制的改革”等环节上,这使得我国当前的节水型社会建设处在一个较低的水平上。当前和今后一段时期内,研究节水型社会建设支撑技术体系,并对其关键技术进行重点剖析与研发是学术界和生产部门的一个重大研究命题。

4 水资源与水环境管理技术

水资源与水环境管理技术是当前国内外资源环境研究领域的重大和热点研究命题之一。从水资源管理的相关研究来看,主要包括以现代经济学理论为关键支撑的水权、水价与水市场研究;另外就是以现代社会学与管理学理论与技术为关键支撑的管理体制与管理政策制定技术研究^[16]。其中,基于绿色核算的水价定价技术和基于水资源合理配置理论为基础的初始水权分配技术研究成为当前国内外研究的热点。在未来的水资源管理技术中,需要进一步结合经济社会发展的阶段性,加强上述研究,进一步融入现代经济学、社会学理论的新发展,建成完整的技术体系。同时,在未来的发展中,还需要进一步融入现代地理信息技术、决策支持技术,促进管理技术的信息化进程^[17]。对于国内外的水环境管理而言,在广泛吸纳现代管理技术的基础上,进一步融入经济与管理的相关机制,如当前在发达国家广泛试点应用的排污权交易等^[18]。从水资源与水环境演变过程来看,理应将两者进行综合集成管理,然而,在世界范围内,广泛存在水资源与水环境分离管理的现象,使得很多管理措施达不到预期的目的。

5 “数字流域”技术

随着数字化社会发展进程的不断加快,如何利用现代信息技术、管理技术对整个流域水资源进行科学有效的管理,进一步提高管理水平,已经成为流域管理所面临的亟待解决的问题之一^[19]。通过数字化流域项目的实施,将现在管理科学和计算机技术如GIS技术、人工智能技术、多媒体技术、数据库技术、虚拟现实技术等有机结合起来,建成适合流域具体条件的、数字化的流域管理环境、模式及管理系统,提高流域管理水平^[20]。

近10年来,GIS、GPS与RS技术出现了强劲的发展:GPS可用于水文地形测量,能够实时、快速地提供目标的空间位置;RS用于实时、快速地遥测降雨、水位等水文物理信息和各种变化;GIS则是对地

理高程、植被率、土壤结构、植物种类等多种时空数据进行综合处理、分析和应用的平台。它们的紧密结合必将为水资源统一管理系统、防洪减灾系统、水资源保护系统、水土保持系统等应用系统提供更强大的功能和服务^[21]。

数字流域必须具备安全、高效的管理各类信息和为各类应用系统提供数据服务的能力^[22],能够服务于一系列的流域管理工作,诸如洪水和灾情的模拟、预测和评估,工程规划、设计,水资源调度、洪水调度方案优化、比选,工程管理、水环境保护、水土保持等方面的有关管理工作;能够实现信息共享和向公众提供信息服务。

数字流域工程技术研究开发建设的最主要目的就是构建数字流域开发软硬件平台,依托该平台,开发数字流域数学物理模型^[23]。流域数学物理模型可以对流域的产汇流、洪水演进和陆地淹没进行三维空间的动态模拟^[24]。这不仅有助于加深人们对陆地水文过程的科学了解,而且能够提高水文时空变化的预报精度。除此之外,数字流域物理模型的应用结果还可以为研究气候变化及环境污染提供所需的高精度水文信息。数字流域工程技术研究开发对加强水文基础理论、开展防洪抗旱减灾、水资源保护利用、水土保持等方面具有广阔的应用前景和积极重要的意义。

6 生态水利技术

传统的水生态工程技术主要体现在流域退化植被(包括水土流失)的综合治理上,水环境工程技术也集中在污染物的防治技术和流域水质的综合治理技术方面^[25],国内外所采用的截污、水体曝气充氧、构建水生生态系统、机械除藻等生态工程措施对抑制藻类生长、改善水环境水生态具有明显的效果。上述两个方面的理论基础分别是植被恢复生态学和环境化学。随着水生态与水环境问题的日趋严峻,对人类社会发展的影响更为深刻。近年来,这方面的工程技术体系随着人类对水认识和治水思路的变化而取得了长足的进步。随着水管理政策从传统的工程水利向资源水利和生态水利转变,水生态与水环境工程的理论基础更为宽广,视野更为广阔。从国内外的相关研究情况来看,当前研究的主要热点是生态需水科学核算与综合管理,水利工程的生态效应与生态功能的科学补偿以及综合生态水利规划^[1]。未来水生态与水环境工程技术研究将进一步以生态水利为重要指导思想,更加重视在变化环境下和竞争性资源开发(包括水土资源)中,如何协调自然生态与人类活动之间的关系,并在两者之间寻

求可持续发展的轨道,真正实现“人水和谐”。

7 水资源评价技术

水资源评价技术是水资源与水生态工程技术体系的核心技术,传统的水资源评价技术以集总式水循环理论为指导,评价的对象也主要是径流性水资源^[26],如全流域水量平衡、河段水量平衡。随着人类对水资源开发利用广度和深度的加强,传统的水资源评价技术和评价准则已经不能适应新形势下实现水资源综合效益充分发挥的要求。有限元模拟、人工神经网络、3S(GIS, RS, GPS)和同位素示踪等技术得到广泛的应用,提高了水资源评价的精度;中国水利水电科学研究院以水循环的各要素过程为出发点,充分考虑水资源的有效性、可持续性和可控性的原则,提出了全口径层次化的动态评价方法体系,并以分布式水循环模型为基础,从降水的有效性出发,提出了不同口径水资源的评价方法体系^[27],需要指出的是,在革新了的水资源评价技术体系中,还增加了对土壤水资源的评价方法。

未来水资源的评价技术中,不仅进行水量评价,将需要进一步考虑到水质对水资源使用情况的影响,还进行包括水质、水环境和水生态、水资源管理等水资源可持续利用的综合评价,建立与水资源相关的多层次、多目标、群决策指标体系进行综合评价,实现水资源的可持续利用及经济和环境的可持续发展。

8 水资源配置技术

水资源配置技术是整个水资源与水生态工程技术体系的核心^[28]。水资源合理配置技术的发展与人类对水资源的开发利用状态相适应,纵观国内外的水资源配置技术,大体可以划分为“以需定供”的水资源配置、“以供定需”的水资源配置、基于宏观经济的水资源配置、面向生态的水资源配置、基于宏观调度方案的水资源配置和基于全口径层次化动态水资源配置^[27-31]。全口径层次化动态水资源合理配置考虑大气水、地表水、土壤水、地下水的转化,对地表水、地下水与土壤水等有效水资源在社会经济和生态环境两大系统进行合理配置,不仅可增加对降水和土壤水的利用,还可将生态环境需水纳入到水资源统一配置的范畴。

在未来的水资源配置技术中,一方面要加强对水循环要素过程的充分考虑;另一方面,还应将水质的影响涵盖到水资源的合理配置中去,进行分质供水,同时,还应该从人工侧支水循环的全要素过程出发,遏制、扭转和逐步改善区域水环境污染和水生态退化的态势。

参考文献:

- [1] CHEN Ji-qi, XIA Jun. Facing the challenge: barriers to sustainable water resources development in China [J]. Hydrological Science Journal, 1999, 44(4): 507-516.
- [2] IHP Bureau. Report on the status of preparation of the IHP-VI draft plan, item 8 of the provisional agenda (IHP/Ie-Xiv/11) [R]. Paris: UNESCO, 2000.
- [3] ZALEWSKI M, JANAUER G A, JOLANKAJ G. Ecohydrology: a new paradigm for the sustainable use of aquatic resource [C] // Conceptual Background, Working Hypothesis: Rational and Scientific Guidelines for the Implementation of IHP-V Project 2.3/2.4, Technical Document in Hydrology. Paris: UNESCO, 1997: 55-80.
- [4] JANAUER G A. Ecohydrology: fusing concepts and scales [J]. Ecological Engineering, 2000(16): 9-16.
- [5] 陈家琦, 王浩, 杨小柳. 水资源学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 45-55.
- [6] 申献辰, 邹晓雯, 杜霞. 中国地表水资源质量评价方法的研究 [J]. 水利学报, 2002(12): 63-67.
- [7] 贾仰文, 王浩. 分布式流域水文模拟研究进展及未来展望 [J]. 水科学进展, 2003, 14(增刊): 118-123.
- [8] 王建华, 江东. 黄河流域二元水循环要素反演研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 16-38.
- [9] 刘克岩, 王桂玲. 以用水为主体的水质水量结合水资源评价方法 [J]. 水文, 2002, 22(3): 32-34.
- [10] ERICH D, MUELLER P. FRG wastewater treatment state of the art in the Federal Republic of Germany [J]. IWC, 1988 (38): 815-821.
- [11] MOZIA S, TOMASZEWSKA M. Treatment of surface water using hybrid processes adsorption on PAC and ultra filtration [J]. Desalination, 2004, 162: 23-31.
- [12] 李圭白, 马军. 用高锰酸钾去除和控制受污染水源水中的致突变物 [J]. 给水排水, 1992, 18(2): 15-18.
- [13] 严登华. 东辽河流域生态水文格局与水环境安全调控 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [14] GREEN G P, HAMILTON J R. Water allocation, transfers and comensurate links between policy and hydrology [J]. Water Resources Development, 2000, 16(2): 197-208.
- [15] TUONG T P, BHUIYAN S I. Increasing water-use efficiency in rice production: farm-level perspectives [J]. Agricultural Water Management, 1999, 40(3): 117-122.
- [16] 方创琳, 鲍超. 黑河流域水-生态-经济发展耦合模型及应用 [J]. 地理学报, 2004, 59(5): 781-790.
- [17] 姜文来. 水资源价值论 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] 沈大军, 梁瑞驹, 王浩, 等. 水价理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] PANAYOTOU T. Economic instruments for environmental management and sustainable development [R]. Nairobi: international Environment Program Harvard Institute for International Development Harvard University, 1995.

(下转第89页)

部冲刷防护工程措施及其与传统防护工程措施结合运用防护效果的研究就具有很重要的现实意义。

参考文献:

[1] BRICE J C, BLODGETT J C. Countermasures for hydraulic problems at bridge [R]. Washington D. C.: Federal Highway Administration, 1978.

[2] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(9): 1260-1269.

[3] BONAUSOUNDAS M. Stromungsvorgang und Kolkproblem [R]. Munich: Technical Univ. of Munich, 1973.

[4] QUAZI M E, PETERSON A W. A method for bridge pier riprap design [C]//First Canadian Hydraulics Conf. . Edmonton, Canada: University of Alberta, 1973: 96-106.

[5] 陆浩. 抛石防护桥墩冲刷水力计算[J]. 泥沙研究, 1993(3): 46-52.

[6] RICHARDSON K J, DAVIS, S R. Evaluating scour at bridges [R]. Washington D. C. : Federal Hwy. Administration, 1993.

[7] LAURSEN E M, TOCH A. Scour around bridge piers and abutments[R]. Iowa City, Iowa: Iowa Highway Research Board, 1956.

[8] LIM F H. Riprap protection and failure mechanics at bridge piers pier [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 1998.

[9] 刘宝山. 对桥墩基础抛石防护的水力计算及实践的几点认识[J]. 泥沙研究, 1984(3): 54- 63.

[10] PAROLA A C, MAHAVADI S K, BROWN B M, et al. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 122(1): 35-40.

[11] 蒋焕章. 桥墩冲刷防护[J]. 公路, 1994(8): 1-8.

[12] 赵殿英, 田伟平. 桥墩局部冲刷的护坦减冲防护[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(4): 161-163.

[13] 周玉利, 崔洪才. 桥墩局部冲刷护坦防护的试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(7): 36-38.

[14] 王亚玲, 孙建民. 桥梁墩台的护坦防护局部冲刷深度计算[J]. 长安大学学报, 2004, 24(6): 37-39.

[15] BREUSERS H N C, RAUDKIVI A J. Scouring [M].

Rotterdam: A. A. Balema, 1991: 28-33.

[16] FOTHERBY L M, JONES J S. The influence of sedfootings on pier scour depths [C]//Hydraulic Engineering Conf. , Reston: ASCE, 1993: 922-927.

[17] BERTOLDI D. Tetrapods as a scour countmeasure [C]//Hydraulic Engineering Conference, San Francisco: ASCE, 1993: 1385-1390.

[18] DARGAHI B. Controlling mechanism of local scouring [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(10): 1197-1214.

[19] ODGAARD A J. Scour prevention at bridge piers [J]. Hydraulic Engineering, 1987, 24(5): 523-527.

[20] KUMAR V, RANGARAJU K G, VIITAL N. Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar [J]. J Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(12): 1302-1305.

[21] MELVILLE B W, HADFIELD A C. Use of sacrificial piles as pier scour countmeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 6(2) 1221-1224.

[22] CHOW K H, OOI S K. Scour protection around a bridge pier [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 1996.

[23] YEOH T. E. Scour protection at bridge piers using a dihedral plate [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 1997.

[24] 房世龙, 唐洪武. 透水框架布设形式对桥墩局部冲刷防护的影响[J]. 人民长江, 2005, 36(7): 63-65.

[25] POSEY C J. Test of scour protection at bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 110(12): 1173-1183.

[26] 郇仲焕. 新沂河桥的浅基防护 [J]. 铁道建筑, 1991(4): 13-15.

[27] ITTY I P. Arizona state government bridge scour program [C]//Proceedings of the Second International Symposium on Scour and Erosion on River Sedimentation, Singapore: ASCE, 2004: 1123-1132.

[28] CHANG F F M, KARIM M. An experimental study of reducing scour around bridge piers using piles [R]. Pierre: Rep. , South Dakota Dept. of Highways, 1972.

[29] PAICE C, HEY R. The control and monitoring of local scour at bridge piers [C]//Hydr. Conf. . New York: ASCE, 1996: 1061-1066.

(收稿日期: 2006-04-18 编辑: 熊水斌)

(上接第 83 页)

[20] 王光谦, 刘家宏, 李铁键. 黄河数字流域模型原理 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 1-8.

[21] JURGEN G, LAWRENC W M. TOPAZ overview [R]. El Reno: USDA-ARS, Graze lands Research Laboratory, 1999.

[22] 李纪人. 遥感和地理信息系统在分布式流域水文模型研制中的应用 [J]. 水文, 1997(3): 8-12.

[23] 尼葛洛庞蒂. 数字化生存 [M]. 胡泳, 译. 海口: 海南出版社, 1996.

[24] 刘家宏, 王光谦, 李铁键. 黄河数字流域模型的建立和应用 [J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 186-195.

[25] 王浩, 雷晓辉, 秦大庸. 基于人类活动的流域产流模型构建 [J]. 资源科学, 2003, 25(6): 14-18.

[26] ZALEWSKI M, McCLAIN M. Ecohydrology: a list of scientific activities of IHP-V projects 2/3/2.4, Technical Documents in Hydrology, No. 21 [R]. Paris: UNESCO, 1998: 1-2.

[27] 水利电力部水文局. 中国水资源评价 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

[28] 王浩, 秦大庸, 陈晓军. 水资源评价准则及其计算口径 [J]. 水利水电技术, 2004, 35(2): 1-4.

[29] 王浩, 王建华, 秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向 [J]. 水科学进展, 2002, 15(1): 123-128.

[30] 游进军, 甘泓, 王浩. 水资源配置模型研究现状与展望 [J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 1-5.

[31] 王浩. 水资源配置系统. 中国资源百科全书: 水资源卷 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1996.

(收稿日期: 2006-10-08 编辑: 熊水斌)