

中国南水北调西线工程水源区水资源立体监测研究

严登华¹ 王浩¹ 秦大庸¹ 翁白莎^{1,2} 徐详德³

(1 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044; 2 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3 中国气象科学研究院, 北京 100086)

摘要 随着全球变化和人类活动影响的加剧, 以及水资源演变的“自然—人工”二元驱动特性凸现, 传统的水资源监测难以满足现代水资源开发、管理与保护的需求, 针对西线工程水源区现有水资源观测站网存在的地基站点稀疏、布局不尽合理、监测手段落后和信息共享不畅等问题, 提出了客观性、整体性、共享性、信息化、经济性五大监测站网优化原则。以气象与水文监测发展规划, 行业规划与标准, 水文、气象及生态监测研究新成果为优化依据, 以GPS水汽观测、AWS自动气象站观测网、风廓线仪、边界层铁塔、探空观测以及多普勒雷达系统等现代化观测手段对区域空中水资源进行监测, 同时, 新增地表水水质站31处、降水站54处、生态水文监测站14处、水位站7处、水文站25处和土壤墒情站14处, 对四川省境内的陆面水资源进行监测, 新增自动气象站观测站点18处、水文站7处和土壤墒情观测站7处, 对坝址以上集水区的陆面水资源进行立体监测, 形成空基—地基一体化的水资源监测网络系统, 为工程建设与运行调度、区域生态保护、经济社会发展提供支撑。

关键词 南水北调西线工程; 水源区; 空中水资源; 水资源立体监测

传统水文监测理念是建立在传统水文学理论基础上的, 无论站网布局还是监测方法理念都是建立在水的自然属性之上, 且将大汽水、地表水、地下水按照行业部门分工进行割裂监测, 监测方法简单, 手段单一^[1]。在我国的资源监测与管理体制中, 水资源监测体系与国家的水文监测体系完全相同。对于水文监测, 自建国以来, 我国已进行多次水文站网的规划工作, 如1955年在学习苏联经验的基础上, 对大、中、小河流分别采用线、面、站群的原则进行规划; 1964年在原有水文站网收集到的水文资料基础上, 用概念性水文模型检验站网规划; 1978年编制了近期(1985年以前)水文站网调整充实规划; 1983—1986年编制出近期(1985—1990年)和远期(1991—2000年)水文站网调整发展规划; 2000年, 水利部水文局组织开展《全国水文事业发展规划》编制工作, 对全国水文站网络进行了全面细致的规划。需要指出的是, 1992年, 水利部颁发了《水文站网规划技术导则》(SL34-92), 作为全国水文规划的技术纲领。

随着全球变化和人类活动影响的加剧, 以及水资源演变的“自然—人工”二元驱动特性凸现, 传统的水资源监测难以满足现代水资源开发、管理与保护的需求,

需要在现代水文水资源学科理论和方法的支撑下, 充分考虑水循环的整体性以及水资源的自然、社会、经济、环境、生态等属性特征, 以3S技术、雷达监测技术、核物理技术、现代通信技术、计算机网络技术等一大批现代科学技术为依托, 建立基于水循环的地基—空基一体化的水资源立体监测系统。

本研究在对南水北调西线工程水源区现有水资源观测站网进行系统评价的基础上, 结合西线工程的规划设计及运行调度, 在水循环陆—气耦合模式指导下, 初步构建西线工程水源区水资源的立体监测体系, 形成空基—地基一体化的水资源监测网络系统, 为工程建设与运行调度、区域生态保护、经济社会发展提供支撑。

1 南水北调西线工程水源区界定及现有站网评价

1.1 水源区范围界定

从水循环的角度来看, 调水工程水源区包括工程坝址处径流的来源区域, 亦即取水坝址的集水区。考虑到西线工程运行后, 将对下游地区的经济社会、生态与环



境产生一定影响,同时,下游河段的水资源需求也会对工程的调水规模产生一定影响。因此,在工程规划、设计、建设与运行调度中需要对下游河段进行充分考虑。为充分提高研究成果的实用性,本研究对上述因素进行了综合考虑,并结合四川省水资源总体配置格局,将宜宾以上的长江流域划定为西线工程的总体水源区,总面积为60.94km²;将取水枢纽(坝址)以上集水区作为核心水源区。

1.2 现有站网构成

南水北调西线工程水源区现有水资源监测系统主要由四部分组成:常规气象站、新一代自动气象监测站点、常规水文站以及专用水文站。上述四类站点分别归属于四个部门:国家和地方气象观测部门、JICA 研究团队、国家及地方水文监测部门、西线工程规划设计部门。其中,用于空中水资源监测的主要是常规气象站、新一代气象监测站点;用于陆面水资源(包括地表水资源、地下水资源和土壤水资源)监测的主要有水文站。此外,在岷江平原地区有一些地下水监测站;在相关的项目研究中,也采用探空和遥感手段获取部分水资源演变信息。

(1) 空中水资源监测。区域内水汽综合气象监测系统由新一代气象综合监测网与常规高空、地面气象观测网组成,现已形成对空中水资源的全面监测^[2]。区内

国家气象站有49个,其中基准站5个、一般站6个、基本站38个(一个已撤消)。这些站大多数建于50年代,传统气象资料系列长。新一代自动气象站(AWS)与GPS水汽观测站于1998年开始陆续投入使用^[3],已有25台GPS水汽观测站和59个自动气象站对水源区内的水汽输送变化进行监测。

(2) 陆面水资源监测。在全国水文观测站网体系逐渐发展与完善的背景下,南水北调西线水源区水文站网建设也取得较大成果,至2000年区内共设有138个国家水文监测站,其中22个水位站,116个降水(蒸发)站^[4]。随着西线工程规划设计工作的开展,引水坝址附近陆续增设了6个专用水文站。

当前,水源区内与西线工程规划和运行调度密切相关的水文站有24处^[5]。其中,雅砻江流域有10处,大渡河流域有14处。在这些站点中,国家站有18处,专用站6处。与南水北调西线第一期工程水文分析计算关系密切的水文测站包括道孚、朱巴、朱倭、绰斯甲、足木足等国家水文站,东谷、泥柯、壤塘、班玛及安斗等专用水文站。各站测验河段河道大体顺直,河床由粗沙及卵石组成,河床基本稳定,部分测站高水势微有冲淤变化。各站基本测验情况见表1。

表1 南水北调西线水源区水文测站特征值一览表

河流名称		站名	地理位置		集水面积 (km ²)	测站类别	备注	
			东经	北纬				
雅砻江	鲜水河	东谷	100° 12'	31° 45'	3824	专用站	2001年6月设立	
		朱倭	100° 19'	31° 38'	4280	国家站	实测流量资料有1958年9月~1961年12月共3年4个月	
		朱巴	100° 41'	31° 26'	6860	国家站	实测流量资料1960年~1962年、1972~2003年共35年	
	鲜水河	道孚	101° 04'	31° 02'	14465	国家站	实测流量资料有1956年~2003年共48年	
大渡河	绰斯甲河	杜柯河	壤塘	100° 48'	32° 20'	4910	专用站	1999年5月设立
		绰斯甲河	绰斯甲	101° 41'	31° 49'	14794	国家站	实测流量资料有1960年、1961年、1967年及1983~2003年共24年
	足木足河	玛柯河	班玛	100° 45'	32° 56'	4337	专用站	1999年5月设立
		阿珂河	安斗	101° 34'	32° 59'	1764	专用站	2003年6月设立
		足木足河	足木足	102° 01'	32° 00'	19896	国家站	实测流量资料有1959年~2003年共45年



1.3 存在问题分析

西线工程水源区现有水资源观测站网尚存在地基点稀疏、布局不尽合理、监测手段落后和信息共享不畅等4方面的问题。

(1) 地基点稀疏。受到高寒气候等因素的综合影响,西线工程水源区水资源地基点十分稀疏。气象站点的布设密度为0.8站/万 km^2 ,坝址以上集水区内仅有7个气象站;整个区内仅有15个自动气象站,其中坝址以上集水区内仅有1个自动气象站,远低于国内平均水平^[6]。水文站点尤为稀疏,远低于国家水文站网规划标准,甚至出现大范围的盲区。大部分地下水资源开发区域缺少观测井或井网密度不能满足要求。总之,现有的地基点观测数据难以满足区域水资源精细评价和工程运行调度的基本要求,且差距较大。

(2) 布局不尽合理。受到观测条件的影响,当前西线工程水源区的水资源观测站点往往位于离县城或乡镇较近的河谷地区。由于该区水循环过程的空间差异十分明显,且受到地形条件的影响十分显著,现有格局下的监测站点布局与区域水循环特征精细表征的矛盾十分显著。以降水为例,若采用通用泰森多边形法,在现有观测站点的基础上进行面雨量的求算,误差可达到20%~30%以上;采用降水随高程演变经验系数进行结果修正,其误差也大于10%^[7]。这表明,该区的水文站网需要进一步完善,同时,还需要充分利用模拟技术和空基观测技术(遥感技术、探测技术等)进行区域水循环演变规律的分析和水资源的定量评价^[8]。

(3) 监测手段落后。本区水资源监测仍然以地基点监测为主,基础设施建设标准普遍偏低,仪器设备老化,监测能力弱,许多测站和观测项目仍依赖人工观测,严重制约了水资源测报信息的传输时效和质量。以四川省水文观测为例,目前80%的测报设施(观测站房、水文缆道、水位测井等)系70~80年代修建,由于建设标准低以及长期没有生产经费而年久失修等原因,测洪能力普遍低于20年一遇,有的甚至低于10年一遇,大洪水到来时不少测报设施因水毁而失去测报时机,严重影响防洪指挥工作的开展。同时,目前大多数测站仍采取人工观测或简单的机械式纸介质自动装置记录,采集信息难以通过各种数字化信息通道及时传送和计算机处理,大多数观测站的仪器设备仍维持在七、八十年代的装备水平,60%以上的测验仪器已达到或超过使用期限,先进的测报设备无力引进,面对超历史洪水,大多数测站仍在拼设备、拼人员甚至拼生命,以超常方式和简陋设备坚持测报,与国内外同行业(或相似行业)普遍采用的自动采集、卫星通讯、计算机处理与传输手段相比,差距十分明显。

(4) 信息共享不畅。本区水资源观测信息分属于四类职能部门:气象部门、水文部门、研究部门和规划设计部门。受到管理体制的制约,部门之间的信息共享较为不畅,使得有限的监测信息的使用价值又进一步降低。

总之,本区的水资源监测较为落后,在未来的发展中,需要在监测站点补充、站点位置优化、更新监测设施、革新监测手段等方面加大投入。

2 监测站网优化原则、依据与目标

2.1 优化原则

水资源监测站点优化的总体原则是:以最少的监测投入获得最完善的水资源时空演化信息。具体包括以下5方面:

(1) 客观性原则。水资源站点要充分遵循区域水循环及其驱动机制的演变规律,明确监测任务和重点^[9]。如在地基空中水资源观测中,要充分考虑到区域大气环流场,以及不同的地形地貌条件导致降水、温度、风速等要素的局地差异;在陆地水资源监测中,要充分遵循地表产流和汇流的演变规律。需要特别指出的是,对于一些水循环特征差异明显或发生时空突变时,应增设有关观测站点和加密观测。

(2) 整体性原则。随着水资源开发程度的深入,需要从水循环的各个要素过程对水资源的演变规律进行定量表征。为此,在水资源监测站网的优化中,要从水循环的整体出发,充分考虑多圈层水循环的基本特征,监测信息的多用途特征,进行统一布置。

(3) 共享性原则。由于受到传统管理体制与机制的制约,当前水资源监测信息难以大范围共享使用。随着管理的规范化、国家观测信息共享平台的建设,信息共享已成为国家资源环境监测的重大发展方向。在水文站网的优化中,要注重对各类观测设施的整合,最大限度发挥观测资源的效应。

(4) 信息化原则。西线工程水源区的水资源监测条件较为恶劣,特别是一些无人区难以布设有人值守测站。对此,可在现代信息技术的支持下,布设无人值守的监测台站;同时,还应充分利用信息化手段,做好信息的传输和使用。

(5) 经济性原则。水资源观测站网的建设是以大量的人力、物力和财力为基础的,在优化的过程中,要对各观测站点的必要性进行充分论证,注重现有观测站点监测能力建设,充分发挥发掘“一站多能”和“一台多站”的布局模式,适当新增观测站点。

2.2 优化依据



西线工程水源区水资源监测站网优化要以气象与水文监测发展规划、有关行业规划与标准为依据,充分利用现有监测网络资源,充分吸纳水文、气象及生态监测相关研究的新成果。如各地气象和水文部门都编制了相应的监测发展规划,为充分发挥区域水资源监测的综合优势,需要充分吸收区域水文监测最新成果;考虑到西线工程水源区的水资源监测体系采取多部门联合管理与信息互惠共享的方式,体系建设与管理应充分参照行业部门的有关规划与标准,如“水文站网优化技术导则”等。

2.3 优化目标

西线工程水源区水资源监测是在充分整合区域水资源监测的基础上,以建成一个立体的、高效的水资源监测网络系统,满足工程规划设计与运行调度的需要为优化目标。具体目标包括两个方面:第一,形成合理的水资源监测空间布局体系,监测网络能覆盖整个水源区,能消除监测盲区,能充分反应区域水资源的演变特征;第二,强化现有台站的信息采集能力,监测的信息化程度得到显著增加。

总之,通过本次规划,形成空基—地基一体化的水资源监测网络系统,为工程建设与运行调度、区域生态保护、经济社会发展提供支撑。

3 地基—空基一体化的立体监测站网体系设计

3.1 总体设计方案

在垂直方向上,要对水循环的大气过程、地表过程、土壤过程、地下过程进行整体监测,同时还对与水循环伴生的水化学过程和水生态过程进行适当监测。采用高精度遥感技术,对区域整体的水循环演变特征进行监测;通过探空、雷达、边界层观测以及 GPS 水气观测等地基观测方式对空中水资源进行观测^[10];通过雨量站、水文站、观测井等对陆面水资源进行观测;充分利用有关实验台站的信息,对重点地区的水资源演变特征进行监测;还需要根据山地垂直地带性特征进行观测。此外,在水平方向上,站点的布设要与区域大气水汽体相吻合^[11,12]。本研究从重点资源量的角度,提出区域重点水资源构成的监测方案。

3.2 空中水资源监测优化方案

水汽通量监测优化方案是以青藏高原及其东部周边地区的水汽输送与水循环结构为基本依据进行设计的^[13]。

南水北调西线调水工程水源区空中水资源监测系统将以中日政府间合作 JICA (Japan International Co-operation Agency) 渠道项目——“中日气象灾害合作研究中心”的观测计划为基础观测资源进行设计。根据

已在高原区域建立的观测站,以及扩大至高原东南周边区域和中国长江流域上游地区的观测计划,设计高原及其东部周边局地水循环过程中大气水汽与地面气象要素的长期观测网布局方案,即在高原及其东部周边地区(青海、西藏、云南、四川)以 GPS 水汽观测和 AWS 自动气象站观测网为主体^[14],辅以风廓线仪、边界层铁塔以及探空观测等现代化观测手段,开展高原关键区水汽输送特征、大尺度水循环结构的监测。南水北调西线调水工程水源区空中水资源监测系统综合观测网的站点布局。

此外,结合南水北调一期工程规划实施,在项目区布置 5 套多普勒雷达系统,对区域空中水资源进行监测。

3.3 陆面水资源监测优化方案

在四川省水文发展“十一五”规划中,从水文站网基础设施建设、水质水量监测、水生态监测、水土保持监测、地下水监测、墒情监测等 6 个方面^[15,16],系统布置辖区的水文监测工作,以满足本区陆面水资源监测需要。本研究在适当介绍重要站点的基础上,重点提出坝址以上集水区陆面水资源的立体监测方案。

3.3.1 四川省境内规划方案介绍

四川省境内将新增地表水水质站 31 处、降水站 54 处、生态水文监测站 14 处、水位站 7 处、水文站 25 处和土壤墒情站 14 处。

3.3.2 新增自动气象站

本区气象资料匮乏,观测工作困难,故应规划布设自动气象站,以对其降水、气温、风速、湿度和辐射等信息进行观测^[17,18]。结合本区现有气象观测站点,需要新增加 18 处自动气象观测站点(AWS),理由如下:1、2 号 AWS 观测莫曲和当曲分水岭气候演变及随高程变化情况;17 号 AWS 一方面用于观测沱沱河源头气象特征,另外一方面与沱沱河相配合,分析高原区高程对气象变化的影响;4 号 AWS 用于观测楚玛尔河源头区气象演变,同时与伍道梁气象站配合分析高层影响;5 号、18 号 AWS 观测水源区北侧气候变化;6 号、7 号 AWS 观测金沙江与雅砻江分水岭的气象特征;8 号、10 号 AWS 监测达区气象变化特征;9 号 AWS 监测鲜水河河谷气象特征;11 号 AWS 监测鲜水河与绰斯甲河分水岭的气象变化特征;12 号 AWS 与 11 号 AWS 配合分析绰斯甲河谷气象条件随高程变化特征;13、14 号 AWS 监测杜柯河气象变化;15、16 号 AWS 观测阿柯河的气象要素变化(见表 1)。

3.3.3 新增水文/水质站

结合河道汇流演进规律,需要新增水文站 7 处(见图 8)。其中 1 号为当曲的控制站;2 号为楚玛尔河控制站;3 号为通天河接纳楚玛尔河和昂尔曲后的控制站;4 号为通天河坝址以上控制站;5 号为雅砻江坝址以上入



库控制站；6号为鲜水河的控制站；7号为杜柯河坝下控制站。其中4、7两站同时进行水质监测（见表1）。

3.3.4 新增土壤墒情观测站

本区土壤墒情资料十分匮乏，影响到土壤水资源的充分利用，因此，根据区域土壤和植被类型，新增加7个土壤墒情点，设置理由如下：从植被类型的角度来看^[19,20]，1、2测站的土壤类型为通天河流域广泛分布的寒钙土和草毡土；3、4测站是大渡河流域广泛分布的草毡土和黑毡土；5测站为大渡河流域典型的毡土；6、7测

站分别为草毡土与石灰性草甸土、非淋溶灰褐土和灰褐土过渡带。从土壤类型来看，1号站点的植被类型为通天河流域广泛分布的草原和稀树灌木草原；2、4、5、6号站点为长江源头地区广泛分布的草甸和草本沼泽；3号站点为受到人类活动影响的灌丛和萌生矮林；7号站点为进入深切河谷区的针叶林（见表2）。因此，上述7个测站能充分代表西线工程坝址以上区域的土壤和植被类型，通过长时间的观测，能为区域水资源演变预测和区域整合整治提供重大基础。

表2 陆面水资源监测新增观测站设站理由

类型	站号	设站理由		
新增气象站	1, 2	观测莫曲和当曲分水岭气候演变及随高程变化情况		
	17	观测沱沱河源头气象特征，分析高原区高程对气象变化的影响		
	4	观测楚玛尔河源头区气象演变，同时与伍道梁气象站配合分析高层影响		
	12	与11号AWS配合分析绰斯甲河谷气象条件随高程变化特征		
	6, 7	观测金沙江与雅砻江分水岭的气象特征		
	8, 10	监测达区气象变化特征		
	9	监测鲜水河河谷气象特征		
	11	监测鲜水河与绰斯甲河分水岭的气象变化特征		
	5, 18	观测水源区北侧气候变化		
	13, 14	监测杜柯河气象变化		
新增水文/水质站	1	当曲的控制站		
	2	楚玛尔河控制站		
	3	通天河接纳楚玛尔河和昂尔曲后的控制站		
	4	通天河坝址以上控制站，同时进行水质监测		
	5	雅砻江坝址以上入库控制站		
	6	鲜水河的控制站		
	7	杜柯河坝下控制站，同时进行水质监测		
新增土壤墒情观测站	1	通天河流域广泛分布的寒钙土和草毡土	土壤类型	通天河流域广泛分布的草原和稀树灌木草原
	2			长江源头地区广泛分布的草甸和草本沼泽
	3	大渡河流域广泛分布的草毡土和黑毡土		受到人类活动影响的灌丛和萌生矮林
	4			长江源头地区广泛分布的草甸和草本沼泽
	5	大渡河流域典型的毡土		进入深切河谷区的针叶林
	6	草毡土与石灰性草甸土、非淋溶灰褐土和灰褐土过渡带		
	7			

4 结论

本研究基于客观性、整体性、共享性、信息化、经济性五大优化原则，以气象与水文监测发展规划，行业规划与标准，水文、气象及生态监测研究新成果为优化依据，在垂直方向上，对水循环的大气过程、地表过程、土壤过程、地下过程进行整体监测，同时还对与水循环

伴生的水化学过程和水生态过程进行适当监测，在水平方向上，布设与区域大气水汽场相吻合的站点，形成空基—地基一体化的水资源监测网络系统，为工程建设与运行调度、区域生态保护、经济社会发展提供支撑。

对于空中水资源监测，提出以青藏高原及其东部周边地区的水汽输送与水循环结构为基本依据进行设计的水汽通量监测优化方案，以GPS水汽观测、AWS自动



气象站观测网、风廓线仪、边界层铁塔以及探空观测等现代化观测手段开展高原关键区水汽输送特征、大尺度水循环结构的监测,此外,结合南水北调一期工程规划实施,在项目区布置5套多普勒雷达系统,对区域空中水资源进行监测。

对于陆面水资源监测,从水文站网基础设施建设、水质水量监测、水生态监测、水土保持监测、地下水监测、墒情监测等6个方面考虑,四川省境内将新增地表水质站31处、降水站54处、生态水文监测站14处、水位站7处、水文站25处和土壤墒情站14处,同时,新增自动气象站观测站点18处、水文站7处和土壤墒情观测站7处,对坝址以上集水区的陆面水资源进行立体监测。

空基—地基一体化的水资源监测网络系统的建立将为水资源监控与调配、水旱灾害防治(预测、预报和预警)和救助、水生态建设及其他突发水问题提供实时信息,为揭示“自然—人工”二元驱动下的水循环演变规律、构建适合中国国情的综合水循环模型提供支撑,促进中国水文水资源理论与技术的整体发展。

参考文献

- [1] 王左,何惠.我国水文站网建设与发展[J].水文,2006,26(3):42-44.
- [2] 曹云昌,方宗义.中国地基ISU气象应用站网建设展望[J].气象,2006,32(11):42-47.
- [3] 谷晓平.GPS水汽反演及降雨预报方法研究[D].北京:中国农业大学,2004.
- [4] 陆桂华,蔡建元,胡风彬.水文站网规划与优化[M].郑州:黄河水利出版社,2001,111-169.
- [5] Ninomiya K. Moisture balance over China and the South China Sea during the summer monsoon in 1991 in relation to the intense rainfalls over China[J]. J Meteor Soc Japan, 1999,77:737-751.
- [6] 何惠,蔡建元.国际河流水文站网布局规划方法研究[J].水文,2002,22(5):18-20.
- [7] Judah L. Cohen, David A. Salstein and Richard D Rosen. Interannual Variability in the Meridional Transport of Water Vapor[J]. Journal of Hydrometeorology,2000,Vol. 1, No. 6, pp.547-553.
- [8] Ian Simmonds, Daohua Bi, Pandora Hope. Atmosphere water vapor flux and its association with rainfall over China in summer[J]. J Climate,1999,12(5):1 353-1 367.
- [9] 牛玉国,张学成.建立基于水循环的水资源监测系统[J].水文,2005,25(1):34-36.
- [10] Bannon J. K. and L. P. Steele. Average water vapor content of air[A]. Met. Geophys. Memoir[C]. 1960,102,38.
- [11] Chen T C. Global water vapor flux and maintenance during FGGE[J]. Mon Wea Rev,1985,113:1801-1819.
- [12] Gabriel Katula, Amilcare Porporato. An analysis of intermittency, scaling, and surface renewal in atmospheric surface layer turbulence[J]. Physica D 215(2006)117-126.
- [13] 王绍武,董光荣.中国西部环境特征及其演变.中国西部环境演变评估(第一卷).北京:科学出版社,2002,29-37.
- [14] 王晓蕾,和健.基于虚拟仪器技术的自动气象站数据采集与处理系统[J].气象科技,2006,34(2):210-214.
- [15] 张静怡,陆桂华.全国水文站网管理信息系统研究[J].水文,1999(6):16-18.
- [16] Daniel L. Cadet and Steve Greco. Water Vapor Transport over the Indian Ocean during the 1979 Summer Monsoon. Monthly Weather Review,1987,vol. 115, No.3,pp.653-663.
- [17] New frontiers of hydrology. Advances in water resources, 28(2005)541-542.
- [18] Hubang Luo and Michio Yanai. The Large - Scale Circulation and Heat Sources over the Tibetan Plateau and Surrounding Areas during the Early Summer of 1979. Part II: Heat and Moisture Budgets. Monthly Weather Review, 1984,Vol. 112,No. 5,pp.966-989.
- [19] 刘士余,左长清.植被对径流影响的研究综述[J].国土与自然资源研究,2005(1):42-44.
- [20] Dieter Gerten, Holger Hoff. Contemporary "green" water flows: Simulations with a dynamic global vegetation and water balance model[J]. Physics and chemistry of the earth, 30(2005):334-338.

作者简介

严登华(1976-),男,安徽省太湖县人,博士,高级工程师.主要从事生态水文模拟、水资源与水环境综合调控及3S技术应用研究. E-mail: yandh@iwhr.com.