

# 南水北调西线工程水源区水资源及其演变规律

王浩, 秦大庸, 严登华

(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 100044, 北京)

**摘要:** 该项目研究以南水北调西线工程水源区为研究区域, 在“自然-人工”二元水循环演变理论指导下, 提出“天地一体化”立体水资源监测方案, 并构建物理机制统一的区域水循环气-陆耦合模型, 实现水循环的大气过程、地表过程、土壤过程和地下过程的整体模拟和动态监测; 以此为支撑, 构建基于“气-陆”耦合模式的水资源评价技术, 以大气水汽通量评价为基础, 进行全口径、层次化、动态水资源评价。

**关键词:** 立体水资源监测; 气-陆耦合模型; 水资源评价; 南水北调西线

**Water resources and its evolution pattern in water source area of West Route Scheme of SNWDP//Wang Hao, Qin Dayong, Yan Denghua**

**Abstract:** This study focuses on water source of West Route Scheme of South-North Water Diversion Project (SNWDP). Under the theory of “natural-artificial” dualistic water cycle model, three-dimensional water monitoring with “integration of air and land” is proposed. An air-land coupled model of regional water cycle that integrated the physical mechanism is built, so that simulation and dynamic monitoring of processes of atmosphere, surface, soil and underground water cycle have been realized. Water assessment based on “air-land coupled model” is created, in order to conduct multi-criterion and dynamic assessment of water resources based on assessment of atmospheric water vapour flux.

**Key words:** three-dimensional water monitoring; air-land coupled model; water resources assessment; West Route Scheme of SNWDP

中图分类号: TV68+TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1123(2008)21-0032-03

南水北调西线工程(以下简称“西线工程”), 是从长江上游金沙江及支流雅砻江、大渡河调水入黄河上游的跨流域重大调水工程, 是补充黄河水资源的不足, 解决我国西北地区干旱缺水的重大战略举措, 是我国“四纵三横”总体水资源配置格局的重要组成部分。

西线工程水源区位于世界第三极—青藏高原的东麓, 是全球变化响应敏感区。来自印度洋和南中国海两股暖湿气流在青藏高原汇合后, 沿着长江流域向东运移, 使得西线工程水源区成为全球水汽环流场中“大三角”的顶端, 从根本上影响到西线工程水源区的水资源时空分异。与此同时, 随

着人口的增长和经济社会的发展, 西线工程水源区下垫面显著变化, 如湿地萎缩, 农业用地和城镇用地的急剧增加以及冰川萎缩等等; 导致区域水循环的产流机制也发生了深刻变化; 随着西南水电能源基地的建设, 河川径流格局也发生了深刻变化。总之, 西线工程水源区的水循环具有显著的“自然-人工”二元特征, 在进行水资源评价时, 需要以二元水循环理论为支撑, 基于径流过程的传统水资源评价方法难以适应该地区研究需要。

该项目研究以水循环气-陆耦合模式为关键支撑, 构建了新一代水资源定量评估技术, 并在南水北调西线工程水源区进行应用。

## 一、基于气-陆耦合模式的水资源评价模型研发

### 1. 水循环气-陆耦合模式构建及校验

#### (1) 模型构建

该项目研究构建起能够模拟区域水循环的大气过程、地表过程、土壤过程及地下过程的气候-水文耦合模型。选取区域气候模式(REGCM3)和水分能量传输模型(WEP模型)作为耦合模型开发的原型模型, 构建气候-水文耦合模拟模型。将天然水循环各要素过程、社会水循环过程、能量过程以及大气过程通过时间空间尺度的转化集成于统一的模拟平台。

收稿日期: 2008-09-26

作者简介: 王浩(1953—), 男, 中国工程院院士, 主要研究方向为水文水资源。

基金项目: 科技部中科院所社会公益研究专项“南水北调西线工程水源区水资源评估技术研究”(2005DIB3J057)。

REGCM3 模型中已含有陆面过程的模拟模块(BATS),但该模块主要是进行天然水循环垂直过程的模拟,且空间尺度较大。为此,在该项目研究中,关键是在 REGCM3 模型总体框架内,利用 WEP 模型对西线工程水源区内水循环的陆面过程进行小尺度的详细描述;同时,地表能量过程也按照陆面水循环模拟尺度要求进行模拟。西线工程水源区以外的区域,仍采用 BATS 模型模拟其陆面过程。

就水循环地表过程与大气过程的耦合而言,其关键就是将地表蒸散发水汽通量输入到大气过程模拟中。对于西线工程水源区范围内的地表过程与大气过程耦合而言,主要建立大气模拟单元与地表模拟单元的空间关系,并将计算其对应的蒸散发通量。将大气在垂直方向上分为 15 层,陆面过程位于第 16 层,各层之间进行水汽通量的交换。气候模式的空间尺度为 10 km,地表过程尺度为 5 km。气陆交界界面的水汽通量传输采用算术平均的方法汇总和分配。

(2)模型校验

在该项目研究中,采用“两步法”进行气—陆耦合模型的校验。第一步是对水循环的大气过程和陆面过程进行独立校验,确立大气水循环过程的基本范围及基本物理过程的参数化方案,以及陆面水循环过程的基本参数。第二步是对整个气陆耦合模型进行整体模拟和校验。

大气过程校验以降水为关键校验因子,陆面水循环过程则以控制性水文站的月径流过程为关键因子。模型校验期为 1985—1995 年,模型验证期为 1996—2000 年(见表 1)。

水循环气—陆耦合模型校验结果表明,耦合模型预测的降水区和降水强度与实测值的吻合较好,表明耦合模型能对区域降水进行很好的预测;以径流为主要校验对象的陆面过程校验结果表明,模型模拟精度较高;除小得石(水文站)以外,径流过

程模拟误差均控制在 5%以内;验证期月径流过程的 Nash 效率系数达到 0.75 以上。总之,该模型可满足分析水资源评价、变化环境下水循环演变规律及驱动机制的需求。

2.基于气—陆耦合模式的水资源定量评价技术框架

该项目研究在区域气—陆耦合模拟平台的支撑下,进行南水北调西线工程水源区的水资源定量评价。从水循环的四个基本过程出发,将区域水资源划分为空中水资源和陆面水资源。其中,空中水资源将从水循环大气过程的角度进行评价,包括大气水汽资源和大气降水资源两个层面;陆面水资源将从水循环的地表过程、土壤过程和地下过程进行评价。在大气降水的基础上,根据水资源的有效性特征,将水资源划分为无效降水和广义水资源;广义水资源又进一步根据其赋存介质/载体,将其划分为土壤水资源和狭义水资源。根据土壤水资源的利用过程,将土壤水资源进一步划分为直接利用的土壤水资源和间接利用的水资源;狭义水资源包括传统意义上的地表水资源和地下水资源;根据其服务对象和水资源配置与管理的需求,又进一步将其划分为生态水和经济水;经济水又进一步划分为生产用水和生活用水两种类型。

二、南水北调西线工程水源区水资源及其演变规律

1.空中水资源及其演变规律

西线水汽源区整个区域以及东、西区域的区域总水汽收支均呈现出

“先减少后增加”的年际变化特征,结合总水汽量年际变化特征的分析可见,两者的年际变化特征基本一致。但区域总水汽收支的年际变化趋势没有水汽总量的变化显著;年代际时间尺度条件下,西线水源区整个区域的水汽总量在 1977 年就发生了由减少趋势转为增加趋势的转折。

南水北调西线工程水源区降水从东南向西北呈下降趋势,青衣江和岷江干流地区多年平均降水量为 1 258.1 mm,是通天河流域同期多年平均降雨量的 3.55 倍。西线水源区整个区域以及东、西区域的夏季降水量的同样呈“降后升”的年际变化趋势。

2.陆面水资源及其演变规律

(1)广义水资源及分布

1956—2000 年系列西线工程水源区广义水资源总量为 4 825.84 亿 m<sup>3</sup>,占区域降水总量的 99.12%。从区域构成来看,雅砻江流域和石鼓以下金沙江干流所占比重最大,分别为 25.23%和 22.65%。从分区广义水资源的特征来看,通天河直门达以上区域和直门达至石鼓区域的低效蒸发量所占比重较大,广义水资源量分别占所在区域降水总量的 96.77%和 96.77%;其他三级区广义水资源量均占到区域降水总量的 99%以上。

(2)土壤水资源及分布

南水北调西线工程水源区总土壤水资源量为 2 390.73 亿 m<sup>3</sup>,分别占区域降水和广义水资源量的 49.11%和 49.54%。从区域构成来看,石鼓以下干流土壤水资源量区域土壤水资源总量的 23.09%;通天河流域所占比

表 1 1996—2000 年验证期模拟结果指标

水文站	实测径流量 年均值(亿 m <sup>3</sup> )	模拟径流量 年均值(亿 m <sup>3</sup> )	相对误差 (%)	月径流过程 Nash 效率系数	相关系数
直门达(通天河)	362.98	377.83	4.09	0.74	0.94
石鼓(金沙江)	1450.78	1439.47	-0.78	0.82	0.93
泸定(大渡河)	884.72	876.37	-0.94	0.83	0.92
夹江(青衣江)	422.17	422.03	-0.03	0.85	0.92
彭山(岷江)	346.26	357.78	-3.33	0.72	0.85
泸宁(雅砻江)	1549.28	1548.83	-0.03	0.85	0.93
小得石(雅砻江)	1772.65	1678.96	-5.29	0.87	0.94

重较小,仅为 10.28%。

(3) 狭义水资源评价

1956—2000 年系列,南水北调西线工程水源区地表水资源总量为 2 429.87 亿 m<sup>3</sup>,加之青衣江和岷江干流区不充分的地下水资源量 0.6 亿 m<sup>3</sup>,区域狭义水资源总量为 2 430.50 亿 m<sup>3</sup>;占区域广义水资源总量的 50.36%;区域产水系数为 0.499。本研究狭义水资源评价量与全国水资源综合规划成果基本吻合。但该项目研究中从水循环要素过程演变的角度进行区域狭义水资源评价,且通过高精度数值地形,进一步校正了各分区范围,通天河流域、石鼓以下干流区和大渡河流域的评价结果与全国水资源综合规划成果数据分别相差了 8.88 亿 m<sup>3</sup>、26.73 亿 m<sup>3</sup> 和 9.73 亿 m<sup>3</sup>;误差分别为 7.13%、4.96%和 2.03%。

(4) 陆面水资源时间演变特征

从南水北调西线工程水源区水资源演变的趋势来看,除石鼓以下干流区水资源呈增加趋势外,其他流域的水资源均呈下降趋势;但这些演变趋势均不显著。

从区域水资源演变的周期性来

看,通天河流域有 8~9 年的演变周期;直门达至石鼓段有 12~13 年演变周期;雅砻江流域有 10~11 年的演变周期;石鼓以下干流的周期性不明显;大渡河流域有 12 年的演变周期;青衣江和岷江干流流域有 14~15 年的演变周期。 ■

参考文献:

[1] 丁一汇,张锦,等.气候系统的演变及其预测[M].秦大河.全球变化热门话题丛书.北京:气象出版社,2003.  
 [2] 范丽军,符淙斌,等.统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J].地球科学进展,2005,20(3).  
 [3] 陈芳,马英芳,等.长江源区近 44 年气候变化的若干统计分析[J].气象科技,2007,35(3).  
 [4] 高艳红,程国栋,等.陆面水文过程与大气模式的耦合及其在黑河流域的应用[J].地球科学进展,2006,21(12).  
 [5] 胡和平,田富强.物理性流域水文模型研究新进展[J].水利学报,2007,38(5).  
 [6] 贾仰文,王浩,等.分布式流域水文模型原理与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

[7] 王中根,夏军,等.分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J].自然资源学报,2007,22(4).  
 [8] 陈仁升,康尔泗,等.黑河源区高山草甸的冻土及水文过程初步研究[J].冰川冻土,2007,29(3).  
 [9] 刘鸿波,张大林,等.区域气候模拟研究及其应用进展[J].气候与环境研究,2006,11(5).  
 [10] 李春龙,闵要武,等.分布式水文模型中多源数据的应用[J].水资源研究,2007,27(3).  
 [11] 刘春葵.气候变化对江河流量变化趋势影响研究进展[J].地球科学进展,2007,22(8).  
 [12] 王浩,秦大庸,等.水资源评价准则及其计算口径[J].水利水电技术,2004(2).  
 [13] 王左,何惠,等.我国水文站网建设与发展[J].水文,2006,26(3).  
 [14] 曹云昌,方宗义,等.中国地基 1SU 气象应用站网建设展望[J].气象,2006,32(11).  
 [15] 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).  
 责任编辑 韦凤年

(上接第 72 页) 洪区、堤防和海堤代码的编制等。

水利史研究室近年来参与了全国洪水风险图的信息管理平台研发任务,开发了基于 ArcGIS 的标准图形符号库,以及基于 Windows 平台的文字注记字体库,初步建立了数字化洪水风险图成果标准,为最终规范我国数字化洪水风险图编制奠定了基础。

七、水利史学科今后的任务

1. 加强水利史基础研究

传统水利科学技术的研究是水利史学科的立足之本。正是老一辈水利史学者扎实的工作基础和严谨的工作作风,水利史研究才能在时代发展的浪潮中不断拓展新的研究领域,为社会和水利建设提供服务。

目前,水利史基础研究在继承前

辈史实考证和综合分析的基础上,又引入了先进的技术手段——信息技术,并取得了良好的开端。今后,水利史将依托各种先进手段,继续加强基础性研究工作。包括继续发掘和整理水利文献资料,开展包括近现代水利史在内的水利通史研究、区域水利史、工程技术史以及水文化方面的研究等。

2. 深化水利史的应用研究,为宏观决策提供参考

水利史研究作为水利科学和历史科学的交叉学科,从一开始就以服务于社会、服务于水利建设为己任。今后,随着经济社会的发展,国土开发和城市化进程的加快,各种水问题将更加突出,如水资源短缺、水环境污染、洪水灾害风险持续上升等,水利事业面临着比其他行业更为严峻的挑战,在此背景下,宏观战略性研究显得迫切和重

要,水利史研究力争抓住时机发展自己。今后重点在水旱灾害与减灾、水资源与水环境演变、水利法规和管理制度建设等方面开展应用性研究工作,为宏观决策提供参考。 ■

参考文献:

[1] 谭徐明,周魁一.经世致用之学——当代水利史研究进展[J].华北水利水电学院学报(社会科学版),2003(4).  
 [2] 谭徐明.水利史研究室 70 年历程回顾[C]//历史的研究与发现.北京:中国水利水电出版社,2006.  
 [3] 朱尔明.20 世纪中国学术大典(水利学)[M].福州:福建教育出版社,2006.  
 [4] 周魁一.中国科学技术史(水利卷)[M].北京:科学出版社,2002.  
 [5] 周魁一.水利的历史阅读[M].北京:中国水利水电出版社,2008.

责任编辑 王晓平