

跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型 ——南水北调东线工程*

刘建林, 马 斌, 解建仓, 赵 勇

(西安理工大学 水文水资源所, 西安 710048)

摘要: 南水北调东线工程是我国水资源优化配置的一项战略性基础工程。以系统分析的思想为基础, 对跨流域多水源多目标多工程调水所涉及的水资源问题分析研究, 建立南水北调东线工程联合调水仿真模型, 提出了调度模型的计算过程以及调算的水文系列和计算时段。建立仿真模型的目的是为南水北调工程决策提供方便实用的科学分析工具和仿真平台, 为工程的决策提供技术支持。

关键词: 南水北调; 东线工程; 联合调水; 仿真模型

中图分类号: TV 213

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2003) 01-0075-05

Simulation Model of Multi-reservoir and Multi-consumer and Multi-workfor Water Unite Regulation of Cross-drainage Basin ——For example of the east route of the south-to-north water transfer project

LIU Jian-lin, MA Bin, XIE Jian-cang, ZHAO Yong

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The east route of the south-to-north water transfer project is strategic base works in water resources optimal allocation in China. Based on the system analyze theory, aim at water resources problem deal with multi-reservoir and multi-consumer and multi-work for water unite regulation of cross-drainage basin, we develop a water unite regulation simulation model of the east route of the south-to-north water transfer project, and a compute process, regulation hydrology catenas and calculate period of time for the simulation model was brought forward. The aim of the simulation model based is provided for convenience and practicality science analyze implement and simulation software flat for decision-making of the south-to-north water transfer project. In order to the project decision-making provided for technology sustain.

Key words: the south-to-north water transfer project; water transfer project of east route; water unite regulation; simulation model

1 前 言

黄河、淮河和海河流域水资源紧张, 已经成为制约该地区经济和社会发展的“瓶颈”, 其水资源总量仅占全国7.7%, 人均占有量 501 m^3 , 不到全国平均水平的1/4, 特别是海河流域人均水资源占有量仅为 348 m^3 , 接近全国平均数的1/6, 明显低于国际上公认的极严重缺水警戒线。突出问题为: ①生活用水难以保证; ②缺水制约工业发展; ③缺水使农业低产; ④生态环境恶化, 水质污染, 地下水超采, 河道断流, 湖泊干涸。

黄淮海流域水资源短缺的问题仅靠节水和挖掘水资源潜力是无法完全解决的, 应在加大节水力度的同时, 进行跨流域调水。长江流域水源丰富, 地理条件极为有利兴建跨流域调水工程。经过几十年研究, 提出了从长江上、中、下游引水的南水北调总体布局, 西、中、东三条调水线路与长江、黄河、淮河、海河相连接形成“四横三纵”的总体格局, 实现我国水资源优化配置。

东线调度仿真系统是南水北调工程仿真系统的子系统, 其核心是东线调水能否满足沿线的需求? 如何使工程达到最大效益? 调水水量? 沿线用户供水保证率? 调水对原用户的影响? 解决受水区和供水区矛盾的办法? 调度系统稳定性? 仿真研究涉及工程技术、社会、经济、政治等各个方面, 是十分复杂的大系统, 研究的方法采用系统仿真试验。研究成果为规划提供决策支持, 对南水北调东线水资源调配有着重要的意义。

2 流域概况及水资源开发利用现状

(1) 淮河流域: 由淮河和沂沭泗两大水系组成, 河流扇形分布, 支流众多, 河系复杂。淮河水系一级支流中,

* 收稿日期: 2002-09-17

基金项目: 国家计委研究项目, 南水北调系统仿真开发研究(计农经2000-1859号)

作者简介: 刘建林, 男, 生于1963年, 副教授, 院长, 在职博士。主要研究方向水文水资源开发利用。

流域面积大于2 000 km²的有16条;沂沭泗水系由沂水、沭河、泗河组成。90年代以来淮河流域旱灾加重,累计成灾面积1 745万 hm²,年均218万 hm²,占耕地的18%。

(2)海河流域:由海河、滦河两大水系组成,流域内地貌类型多样,河流扇形分布,支流众多,河系复杂。海河包括北三河、永定河、大清河、子牙河、漳卫南运河、黑龙港水系和海河干流等,海河干流起自天津市金刚桥,东流至大沽入海,海河流域素有“十年九旱”之说。1368~1948年的580年间,曾发生337次旱灾;1950~1980年平均旱灾面积约148万 hm²。滦河位于海河流域东北部,为单独入海河流。

(3)黄河以南地区:受水区地处淮河流域下游平原,跨淮河和沂沭泗两水系,水资源较丰富,但丰枯变化大,调节能力小,可利用量受到限制。

(4)江水北调地区:位于淮河及沂沭泗下游平原,供水范围目前已基本覆盖整个苏北地区,地表水较丰,但年际和年内丰枯变化悬殊。区内地势平坦,调蓄能力低,水资源供给受当地降水和上游来水影响较大,经常发生旱灾,而且旱涝频繁。

(5)南四湖和东平湖地区:周边地区水资源日益衰减,平水年地表水基本利用,南四湖大多数年份不能蓄满。城市用水主要抽取地下水,污水排入南四湖,生态环境严重恶化。该区1998年地表水利用率为60.3%,地下水利用率已达116.0%,现状缺水属于资源性缺水。

(6)山东半岛:面积5.9万 km²,现状人均年用水量246 m³,是我国缺水最为严重的地区之一。地下水是主要的供水源,已持续超采,部分地区已海水入侵。黄河是山东半岛的重要补充水源,但黄河持续断流和泥沙淤积问题限制了引黄水量。地表水利用率为34.7%,地下水利用率为88.4%。现状缺水属于资源性缺水。

(7)黄河以北地区:地处海河流域下游,工农业生产多用地表水,自从各河上游修建了山区水库,山区基流得到有效控制,因而,本区入境水量随之减少,水源由地表水为主转向以地下水为主。

3 工程规划

东线工程规划从江苏扬州附近长江干流引水,利用京杭大运河及其平行河道输水逐级提水北送。连通洪泽湖、洛马湖、南四湖和东平湖,在位山附近通过倒虹隧洞穿过黄河,利用卫运河、南运河等河道自流到天津,新建和扩建千顷洼、大屯、大浪淀、北大港等调蓄水库。从长江到天津北大港水库输水主干线全长1 156 km(其中黄河以南646 km,穿黄段17 km,黄河以北493 km),为山东半岛输水线路长701 km^[4]。工程实施后可解决天津、河北黑龙港运东地区、山东鲁北、鲁西南和胶东部分城市水资源紧缺问题,并具备向北京供水的条件。

(1)规划水平年:现状水平年为1998年,东线工程规划分为3个阶段:应急工程规划水平年是2005年;第一期工程规划水平年是2010年;第二期工程规划水平年是2030年。

(2)供水目标及范围:合理的供水范围分为3片:^①江苏里下河地区以外的苏北地区和里运河东西两侧地区,安徽蚌埠市、淮北以及沿淮、沿新汴河、沿高邮湖地区和山东南四湖、东平湖地区;^②山东半岛;^③黄河以北淀东清南天津平原,河北黑龙港东部平原、运东平原和山东徒骇河平原。供水区分布有淮河、海河、黄河流域的天津、济南、青岛、徐州等25座地市级以上城市,生活、工业、航运设计供水保证率为97%;淮河以南农业灌溉设计供水保证率为95%;淮河以北为75%;下级湖以南为75%。

(4)供水线路:利用现有江水北调工程,并扩大规模,向北延伸而成,充分利用京杭运河及淮河、海河流域现有河道和建筑物。黄河以南沿线洪泽湖、洛马湖、南四湖和东平湖4个调蓄湖泊,形成4大输水工程,湖与湖之间均设3级泵站,南四湖上、下级湖之间设一级泵站,从长江到东平湖共设13级泵站,地面高差40 m,总扬程65 m。

现有河道输水能力大部分满足近期调水要求,并具有扩建能力,南四湖以南采用双线或三线并联河道输水;南四湖以北基本为单线河道输水。具体输水线路如下:从长江到洪泽湖,有三江营引水,分运东和运西两线,分别利用里运河、三阳河、苏北灌溉总渠和淮河入江水道送水;洪泽湖到洛马湖,采用中运河和徐运河双线输水,新开子新河和利用二河从洪泽湖引水入中运河;洛马湖至南四湖,有三段输水线路:中运河—韩装运河、中运河—不牢河、中运河—房亭河。

南四湖内除利用全湖输水外,须在部分湖段开挖深槽,并在二级坝建泵站抽水入上级湖;南四湖以北至东平湖,利用梁济运河、柳长河输水至八里湾,由泵站抽水入东平湖。在解山和位山之间穿黄,黄河河底下70 m打通一条直径9.3 m的倒虹隧洞,全长16.89 km。江水出动平湖后穿黄河,通过小运河至临清,立交穿过位运河,经吴临渠入南运河道九宣闸,再由马厂减河送水到天津北大港水库。胶东输水分干线西起东平湖,东至威海市米山水库,全长700 km,设7级泵站,自西向东分为西、中、东三段,西段即原西水东调工程;中段利用引黄济青渠段;东段为引黄济青渠道以东河段。

4 水源条件

长江水资源:东线工程主要水源是长江水。长江水量丰富、稳定,多年平均入海水量达9 560亿 m^3 ,径流年内和年际变化较小,即使在特枯年份也有6 000多亿 m^3 。东线工程从长江下游三江营取水,距入海口约280 km,引水段水深20~30 m,长江水位在绝大部分时间内都能满足引水要求,而且三峡工程建成后,可以加大枯水季节的流量。东线工程引长江水160亿 m^3 ,也仅占长江入海水量的1.67%^[4]。

淮河流域水资源:有淮河、沂、泗、汶等水系,分别汇入洪泽湖、洛马湖、南四湖和东平湖。除大汶河来水在黄河水资源中分配,其它各河来水和江水在东线工程运用中统一调度。淮河流域各水系丰枯变化很大。枯水年份当地径流很少,一般年份在汛期各水系均有不同程度的弃水,除少数年份外,洪泽湖和洛马湖弃水量分别在50~250亿 m^3 和10~20亿 m^3 之间,即使在冬春洪泽湖也有7~220亿 m^3 的弃水量。

5 调度模型的建立

5.1 水资源量分析

首先确定主要的水资源量,建立的调度模型才能够符合实际,切实可行。

(1)调出区:是跨流域调水工程的水源地,目前仅限于计算多年平均可调水量及调水量过程,对特枯水年或特枯水年组的可调水量及相应保证措施研究较少。因此应注意以下问题:^①不影响调水区用水的可调水量。这个调出水量是用以说明调水工程的可行性,如果调出水量很少或仅在丰水年可提供调出水量,则应对工程的可行性进行慎重的研究;^④采取一定工程措施后的可调水量。即研究调水规模的发展余地,如果可调出水量较不做工程增加较多,而且工程投入较少,则说明该调水工程有发展潜力。

(2)调入区:跨流域调水工程的用水区,一般为水资源短缺的地区。应重点研究:^①已知调入水量和过程的前提下,合理确定供水范围,以保证充分有效利用调入水量。供水范围较大,可能使重要供水用户的用水经常遭到破坏;反之,供水范围较小,调入水量就不能得到充分利用,造成浪费;^④如何使用已有工程,充分利用调入的水量,提高供水保证率,其实质是研究多水源多用户多工程的联合调度问题。

(3)主要控制性工程调度:水源控制工程的调度是协调调出区的保证用水和加大调出水量,提高调入区缺水期调入水量之间的矛盾,其实质是优化调度问题。东线工程的水源控制工程是黄河以南的五大湖泊,其中最主要是洪泽湖和洛马湖。优先保证本流域用水并为流域发展留有余地的前提下,尽可能多的向北方调水,可以采用建立限调线的方法进行优化调度。

5.2 调度原则及方法

东线工程输水河道和沿线水库是在原有工程基础上扩建、北延而成的,应遵循以下调度原则:^①调水工程兴建不影响原有灌区合理用水;^④江水、淮水并用,淮河枯水年多抽江水,淮河丰水年多用淮河水;^④充分利用当地水资源,当地水资源不足时逐级从上一级湖泊调水或调江水补充;^{1/4}黄河以南各调蓄湖泊规定北调控制水位,低于此水位时,停止从湖泊抽水;^{1/2}首先满足城市生活、工业及航运水,其次是黄河以南农业灌溉,然后是北方输水沿线农业灌溉补水;^{3/4}第一期工程抽江规模较小,对长江口盐水入侵影响甚微,不需“避让”。第二期工程,在长江大通站流量小于9 400 m^3/s 时,限制抽江流量不超过400 m^3/s ,大通站流量在9 400~10 000 m^3/s 之间时,抽江流量不大于大通站9 000 m^3/s 。遇抽江“避让”时,各湖泊优先向供水区的城市供水;^⑧黄河以北优先考虑没有调蓄水库的片,各片按本时段分的水量供水。蓄供片用本时段分的水量供水,不能满足时,再由水库补水;本时段有余水,优先向缺水片供水,然后向水库充水。

该工程是一个多水源、多用户、多调节水库的大系统,工程建成后,各地区的权益具体表现在获得的水量上,如何协调各地区与各用水部门之间的矛盾,使工程发挥最大效益,是一个多目标决策分析的问题。因此,本文拟采用系统分析的方法,并应用优化理论进行水量调配研究。

水文系列和计算时段:采用从1956年7月到1997年6月共42年水文资料,各湖泊规划入湖径流为天然径流扣除规划水平年的上游用水。计算中各水库按水文年7月1日至次年6月30日统一调度,黄河以南各湖泊起调水位为汛限水位,黄河以北各水库起调水位取满库容的一半,计算年内以旬为单位划分计算时段,全年共36个计算时段。

5.3 数学模型的建立

东线工程是跨流域多水源多目标多工程供水模型,跨区多部门水量的调度和分配的优化、工程配置的合理性、各水系、湖泊、地区防洪排涝的结合程度、解决调出区与调入区的矛盾等是确定调度模型时应该考虑的因

素。这样一个庞大、复杂的供、输、蓄水系统,不可能考虑所有因素,为了使模型简化又真实反映东线工程的特点,建模时考虑对工程影响较大的主要因素,突出整个工程的供水效益,将多目标的综合利用问题转化为单一目标求解,其效益均用供水量表示。水量调配模型简化如图1。供水沿线共分了11片,黄河以南5片,黄河以北6片,11个单元自成系统,通过泵站、河道相联系。

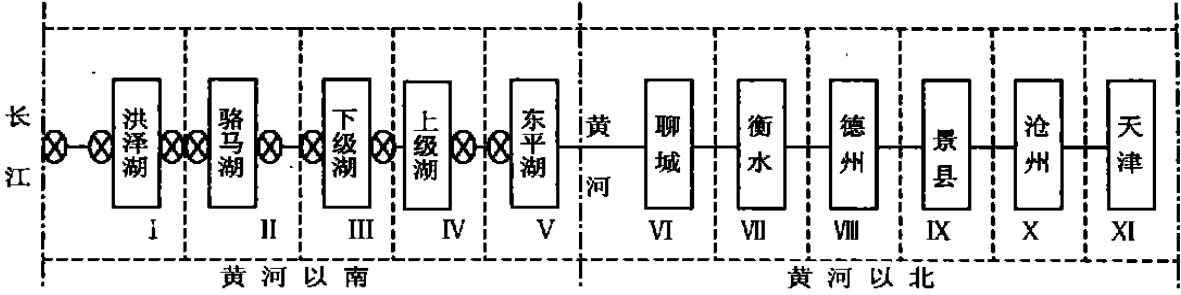


图1 水量调配模型简化图

(1) 黄河以南子系统: 该子系统调配示意图如图2, 建模考虑以下因素:^① 突出5个湖泊本身调节能力, 反映各湖泊之间水量调配, 忽略输水河网调蓄功能;^④以湖泊为中心, 相应将湖泊之间复杂状况简化为单一河道, 各湖泊形成串联结构, 抽水泵站群复合在各湖泊出口和入口;^④对于系统内的各级泵站, 只考虑其补给过程, 忽略水头变化对抽水效率的影响。子系统以5大湖泊为基础划分为5个计算单元(每单元一片): 洪泽湖片; 洛马湖片; 下级湖片; 上级湖片; 东平湖片。

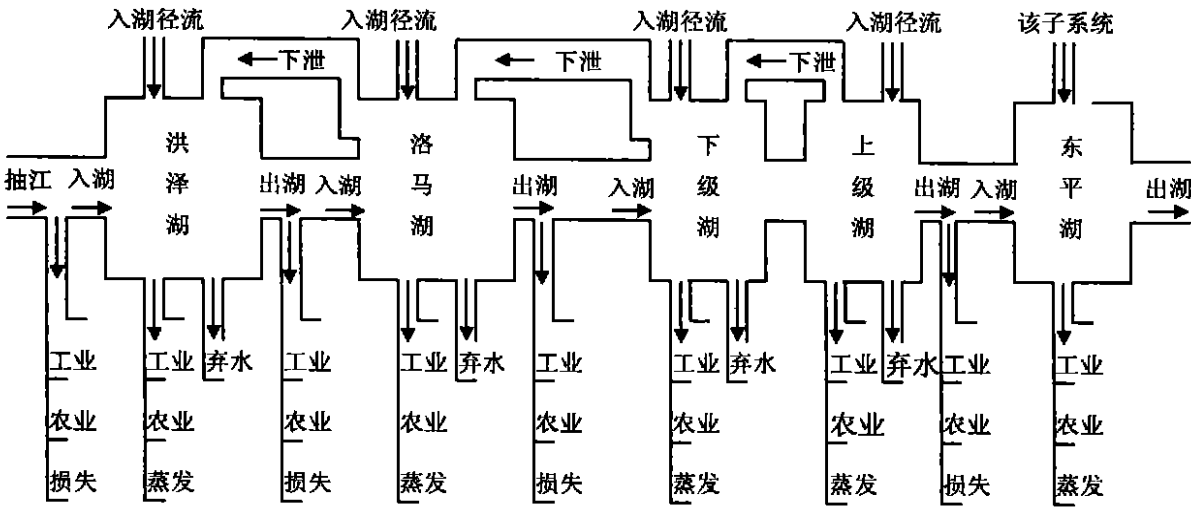


图2 黄河以南水量调配示意图

(2) 黄河以北子系统: 概化为6个分水口门, 相应分为6片, 为了提高供水保证率, 规划4座蓄水工程: 北大港、大浪淀、千顷洼和大屯水库。建模的主要因素:^① 水库、蓄水河道自身节水量能力和它们之间相互补偿作用;^④以河道为中心, 简化为单一河道, 形成串联结构;^④各片内有需水量和水库蒸发量, 不再考虑输水损失。黄河以北子系统分为6个计算单元(片): 聊城片; 衡水片; 德州片; 景县片; 沧州片; 天津片。衡水、德州、沧州、天津片分别对应千顷洼、大屯、大浪淀、北大港水库; 聊城片和景县片没有调蓄水库。

5.4 数学模型

(1) 目标函数: 东线工程各地区的权益具体表现在获得的水量上, 通过多目标决策分析协调各地区与各用水部门之间的矛盾, 使工程发挥最大效益。而为了突出整个工程的供水效益, 又将多目标的综合利用问题转化为单一目标求解, 其效益均用供水量表示, 取缺水最少作为优化计算的目标函数。即:

$$OBJ = \min_{j=1}^m \sum_{i=1}^n TB(i, j)$$

(2) 水量平衡方程式: 据图1水量调配模型简化图, 系统由11个计算单元组成, 各单元在每一时段之间的联系都应符合水量平衡原理。各单元之间关系如图3, 水量平衡方程式为:

$$V(i, t+1) = V(i, t) + Q(i, t) + PR(i, t) + T(i, t) - W(i, t) - PC(i, t) - D(i, t) - LOS(i, t)$$

其中: $Q(i, t) = \sum_{j=1}^2 Q_j(i, t)$; $W(i, t) = \sum_{j=1}^2 W_j(i, t)$; $T(i, t) = \sum_{j=1}^2 TB_j(i, t)$

$$D(i, t) = D_o(i, t) + D_l(i, t) - D_i(i, t); LOS(i, t) = \sum_{j=1}^2 B_j(i, t)$$

式中: $Q_1(i, t)$, $Q_2(i, t)$, 分别表示第 i 片 t 时段湖区和区间的天然径流量; $W_1(i, t)$, $W_2(i, t)$ 分别表示第 i 片 t 时段湖区和区间的预测需水量; $PR(i, t)$, $PC(i, t)$ 分别表示第 i 片 t 时段调入、调出的水量; $TB_1(i, t)$, $TB_2(i, t)$ 分别表示第 i 片 t 时段湖区缺水量和区间缺水量; $V(i, t)$, $V(i, t+1)$ 分别表示第 i 片 t 时段湖泊的时段初库容和时段末库容; $B_1(i, t)$, $B_2(i, t)$ 分别表示第 i 片 t 时段湖面降雨与蒸发的代数和及输水损失; $D_i(i, t)$, $D_o(i, t)$, $D_l(i, t)$ 分别表示第 i 片 t 时段从河网泄入湖泊、从湖泊泄入河网和从湖泊泄入系统外的余水量。

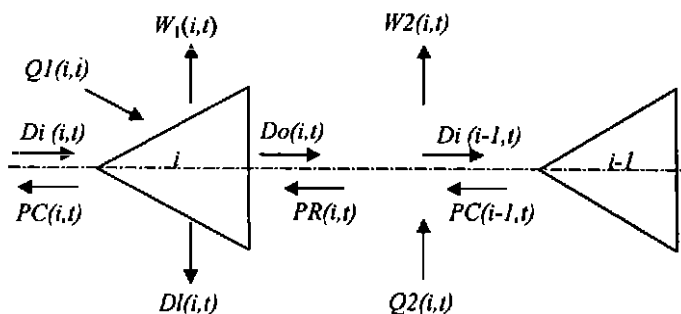


图3 计算单元关联图

(3) 约束条件: ① 保证率约束: 各段、各部门供水保证率应达到设计保证率要求; ④ 蓄水库容约束: $V_{\min}(i, t+1) \leq V(i, t+1) \leq V_{\max}(i, t+1)$; ④ 抽水能力约束: $PR(i, t) \leq PR_x(i, t)$, $PC(i, t) \leq PC_{\max}(i, t)$; ④ 弃水量约束: $D_i(i, t) \leq D_{i\max}(i, t)$, $D_l(i, t) \leq D_{l\max}(i, t)$; ④ 北调控制线约束: $V_{\min}(i, t) \leq V(i, t) \leq V_l(i, t)$ 。

其中: $PR_{\max}(i, t)$ —— 第 i 库 t 时段入库规模; $PC_{\max}(i, t)$ —— 第 i 库 t 时段出库规模; $D_{o\max}(i, t)$ —— 第 i 片 t 时段河网承泄能力; $D_{i\max}(i, t)$ —— 第 i 片 t 时段湖泊的承接泄水的能力; $D_{l\max}(i, t)$ —— 第 i 片 t 时段泄出系统外的能力; $V_l(i, t)$ —— 第 i 库 t 时段北调控制线($i = 1, 2, 3, \dots, 11, t = 1, 2, 3, \dots, 36$)。

(4) 边界条件: ① 起调水位: $H_1(i, 1) = H_x(i)$, $i = 1, 2, \dots, 9$; ④ 传递条件: $H_j(i, 36) = H_{j+1}(i, 1)$, $i = 1, 2, \dots, 9, j = 1, 2, \dots, 42$ 年; ④ 各级工程规模和北调控制线在方案比较时可取不同值。其中: $H_1(i, 1)$ —— 第 i 库第 1 年第 1 时段水位; $H_x(i)$ —— 第 i 库汛限水位; $H_j(i, 36)$ —— 第 i 库第 j 年最后 1 个时段末水位; $H_{j+1}(i, 1)$ —— 第 i 库第 $j+1$ 年第 1 个时段初水位。

5.5 计算过程

调节计算对数学模型采用了以黄河为分界线, 以穿黄水量为关联变量, 黄河以南和黄河以北子系统分别调算的方法。先根据工程规模计算黄河以南各片的调入、调出各湖的水量和穿黄的水量, 将这一穿黄水量作为黄河以北调度的输入, 进行黄河以北的调节计算, 再判断黄河以北各片的缺水、余水情况, 调整黄河以南穿黄水量, 重新进行黄河以南调算, 再计算黄河以南各湖调入、调出湖和穿黄水量, 反复迭代, 直到黄河以北的缺水、余水达到满意程度为止。

参考文献:

- [1] 马斌, 解建仓, 阮本清, 等. 基于构件式的水资源调度管理模式及其应用研究[J]. 水利学报, 2000(12): 26-30.
- [2] MA Bin, XIE Jian-cang, CHANG Ying-jin, et al. Water Resources Operation and Management Model and Its Simulation Process Research[J]. Systems Science and Systems Engineering, 2001, 10(3): 328-338.
- [3] 张修真, 等. 南水北调中国可持续发展的支撑工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] 肖田元, 等. 系统仿真导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 叶秉如. 水资源系统优化规划和调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [6] 王银堂, 等. 南水北调中线工程水量优化调度研究[J]. 水科学进展, 2001, 20(4): 45-48.

上接第36页

参考文献:

- [1] 钱民辉, 贺卫光. 小流域, 大问题——甘肃省肃南裕固族自治县生态环境持续恶化所引起的综合问题及思考[J]. 中国小民族社会经济调查, 2001(3): 30-44.
- [2] 丁宏伟, 郝明林, 等. 黑河中下游水资源开发中出现的环境地质问题[J]. 干旱区研究, 2000, 17(4): 11-16.
- [3] 龚家栋, 董光荣, 等. 黑河下游额济纳旗绿洲环境退化及综合治理[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 44-50.
- [4] 曲耀光, 樊胜岳. 黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 1-8.
- [5] 金博文, 张掖地区生态经济型防护林体系优化配置模式选择[J]. 甘肃林业科技, 1997(3): 42-44.