水　利　学　报
2021年3月　　SHUILI　XUEBAO　　第52卷　第3期

文章编号：0559-9350(2021)03-0265-12

流域水资源供需双侧调控模型及应用

王宗志[1]，叶爱玲[1]，刘克琳[1]，金菊良[2]

（1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，江苏 南京 210029；
2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院，安徽 合肥 230009）

摘要：针对水资源常规配置中供需分离、配置与调度结合不紧密，难以支撑流域水资源严格管理的问题，提出流域水资源供需双侧调控模型。在需水侧，通过建立供水量和效益函数关系，并考虑水土资源等约束条件，构建农业种植结构与灌溉制度优化模型；在供水侧，采用模拟与优化、配置与调度相结合的两阶段建模路径，构建多水源配置与水库群优化调度模型；通过来源于需水侧模型的“需水过程”与来源于供水侧模型的“可供水过程”的分解与耦合，实现供需双侧的联合调控，综合集成构建流域水资源供需双侧调控模型。将该模型应用于南四湖流域，提出了南四湖上级湖、下级湖等大型湖库工程的优化调度图与不同年型下农业种植结构和水资源配置方案，验证了模型的有效性。通过供需双侧协调优化，南四湖流域供需缺口缩小，农业种植效益增加，枯水年水分生产效益提高了0.70元/m^3、平水年水分生产效益提高了0.63元/m^3；生活和工业供水保证率稳定在95%，生态和农业供水保证率明显提升，分别由53%提高到71%、由67%提高到75%。

关键词：水资源管理；水库调度；供需双侧调控；种植结构；南四湖流域

中图分类号：TV213.9　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20200356

1　研究背景

流域水资源调控是指通过地面水利工程、地下蓄水空间和人类用水行为等方面的调节，使流域水资源时空分布与经济社会和生态环境需求尽可能相适应的过程，通常包括水资源配置和水利工程调度两个阶段，是实现水资源合理利用、缓解水资源短缺矛盾的有效手段和核心任务。水资源配置研究经过近30多年的发展，在理念上经历了以需定供、与宏观经济结合、水量水质一体化等多个阶段[1]，但总体上都是把需水作为约束条件或边界条件，以供水量最大、缺水量最小或经济效益最大为目标函数，建立区域水资源配置模型，提出尽可能满足区域需水的水资源配置方案[2-5]，即更多关注的是供水侧，而对供给侧与需求侧联合调控考虑较少。农业是流域用水的主要用户，随着人口增加、城市化进程加快和人们生活水平提高对水资源的高质量要求，工业和生活用水呈现刚性增长态势，为农业用水结构适应性调整、强化节水提出了迫切需求，因此灌区水资源配置成为区域水资源配置领域的重点研究对象[6]。

对于灌区水资源配置，大都以一定的水资源、土地资源为约束，通过优化种植结构和灌溉制度，实现水资源约束条件下的经济效益最大化[7-9]，通常是建立以可供水量作为约束条件或边界条件、以作物种植效益最大为目标函数的水土资源优化配置模型，对给定的可供水过程在灌区内进行优化分配[10-11]，鲜见供需双侧调控研究[12-13]。实际上，实施供需双侧调控，服务水资源集约化利用，是落实当前“节水优化、空间均衡、系统治理、两手发力”治水理念和实现最严格水资源管理制度考核的必然要求；此外，由于水利工程是水资源系统的重要组成部分，也是实现水资源优化配置的微

收稿日期：2020-05-22；网络首发时间：2021-02-23
网络首发地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210222.1713.001.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0408005)；水利部技术示范项目(SF-201803)
作者简介：王宗志(1977-)，博士，教授级高级工程师，主要从事水资源复杂系统运行调度与管理研究。E-mail：zzwang@nhri.cn

观载体，把水利工程调度和水资源配置结合起来，是在流域水利工程特别是蓄水工程建设基本完善的条件下，实现水资源宏观配置与微观调控统一的重要需求[14-16]。然而，以往水资源配置与水利工程调度服务于不同目标，二者结合不紧密。前者旨在提出规划建设湖库工程、增加可供水量与强化节水、减少需求，压缩供需缺口的策略，后者则服务于工程运行管理，提出湖库工程运行调度规则和运行方式。

为此，针对目前水资源常规调控模式供需分离、配置与调度不结合，难以支撑水资源严格管理和集约化开发利用的新需求，本文尝试建立流域水资源供需双侧调控模型，提出供需双侧协调、配置与调度紧密结合的水资源调控新模式，以南四湖流域为实例开展应用研究，从经济效益、节水效益、供水保证率等方面评价模型的合理性和有效性。

2　流域水资源供需双侧调控模型

流域水资源供需双侧调控模型，包括数据录入、模型构建与结果分析三部分，如图1所示。其中需水侧模型(需水预测模型)与供水侧模型(多水源配置模型、工程调度模型)构建是核心。需水预测模型，涵盖生活、工业、生态和农业4个用户，其中农业需水模型是本文重点研究内容之一；供水侧模型，包括多水源配置与工程调度模型。需水侧模型(农业需水模型)、供水侧模型(多水源配置模型与湖库调度模型)都有各自的目标函数、约束条件，既具有一定的独立性，又能通过“可供水过程”与“需水过程”的分解耦合，将需水侧模型输出作为供水侧模型的输入，将供水侧模型的输出作为需水侧模型的输入，实现流域水资源供需双侧之间的联合调控；多水源配置模型与湖库调度模型之间，通过前者给出的系统缺水量激励湖库调度模型进一步优化，进而给出可供水量的分配方案，传输到多水源配置模型，实现多水源配置与工程调度的统一。

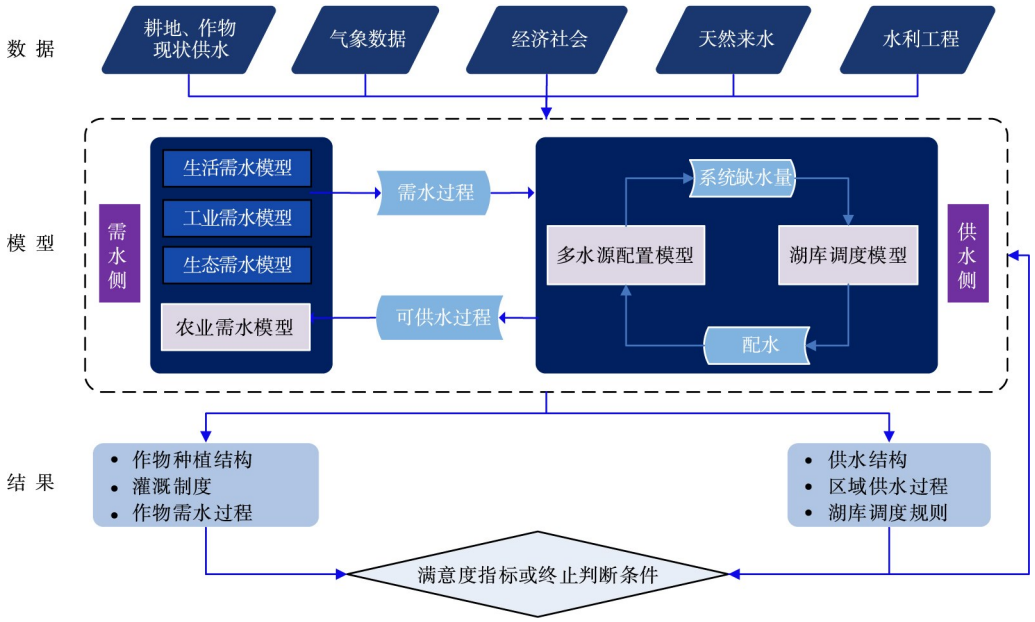


图1　流域水资源供需双侧调控模型框架

与水资源常规配置模式的本质区别在于，供需双侧调控模型可通过同时优化调整产业结构、种植结构和水利工程调度运行方式，实现水资源与经济社会、生态环境的良好匹配，以及水资源宏观分配方案与水利工程微观调度方式的统一。该模型的时间尺度可选择月、旬、日，既可针对不同年型进行模拟分析，也可进行长系列分析模拟。

2.1　需水侧模型　本研究考虑到生活和工业需水，受降水丰枯变化影响相对较小，且在流域需水结构中比例不大，本文采用定额法进行预测分析；河道内生态环境需水，采用Tennant法，按照多年平

均流量的10%标准确定。农业需水受气象水文、作物种植结构等要素影响大，也是流域用水大户，是需水侧模型的重点考虑对象。作物产量模拟是农业需水优化模型的重要组成部分，常采用历时作物产量调查统计法[17]、水分生产函数法[18-19]。本文基于非充分灌溉原理，采用Jensen水分生产函数模拟时段灌溉水量和最终产量的关系计算作物产量[20]，将供水过程对农业的影响体现在最终产量上，旨在通过优化农业种植结构和灌溉制度，协调与来水条件匹配度更好的需水过程，在有限水资源量下提高水分利用效率，实现灌溉经济效益最大化。模型以不同作物的种植面积和每个计算时段内分配给每种作物的灌溉水量作为决策变量。

(1)目标函数。以作物种植经济净效益最大为目标函数，净效益为种植农产品经济效益与种植成本和灌溉水费之差，目标函数如下式：

$$f=\max\sum_{l=1}^{N_1}x_l\left(Ya_l Pc_l-C_l-Pw\sum_{m=1}^{N_{2l}}I_l^{\,m}\right) \tag{1}$$

式中：l为作物类型，m为作物生育阶段；N_1为作物种类数，N_2为作物生育阶段数；x为作物种植面积，km²；Ya为作物实际单产，kg/km²；Pc为作物单价，元/kg；C为作物生产所需投入除水费以外的固定费用，元/km²；I为作物生育阶段内分配到的毛灌溉水量，m³/km²；Pw为灌溉用水价格，元/m³。

作物实际产量Ya采用Jensen模型进行计算，其中作物实际蒸发量采用联合国农粮组织FAO推荐的Penman公式进行计算[21]，具体如下：

$$\frac{Ya_l}{Ym_l}=\prod_{m=1}^{N_{2l}}\left(\frac{ETa_l^{\,m}}{ETm_l^{\,m}}\right)^{\lambda_l^m} \tag{2}$$

$$ETa_l^{\,m}=Ks_l^{\,m}ETc_l^{\,m} \tag{3}$$

$$ETc_l^{\,m}=Kc_l^{\,m}ET_{0l}^{\,m} \tag{4}$$

$$Ks_l^{\,m}=\frac{TAW_l^{\,m}-Dr_l^{\,m}}{TAW_l^{\,m}-RAW_l^{\,m}}=\frac{TAW_l^{\,m}-Dr_l^{\,m}}{\left(1-p_l^{\,m}\right)TAW_l^{\,m}} \tag{5}$$

$$p_l^{\,m}=p'_l+0.04\left(5-\frac{ETc_l^{\,m}}{N_{3l}^{\,m}}\right) \tag{6}$$

$$TAW_l^{\,m}=H_l^{\,m}\left(\theta_{FC}-\theta_{WP}\right) \tag{7}$$

式中：N_3为作物生育阶段持续天数；Ym为作物充分供水条件下的最大产量，kg/km²；ETa为作物生育阶段内的实际蒸发蒸腾量；ETm为充分供水条件下作物蒸发蒸腾量，等于ETc，ET_0为作物参考蒸腾蒸发量，mm；λ为水分敏感系数，反映作物在生育阶段内对缺水的敏感程度；Kc为作物系数，与作物种类和生育阶段有关；Ks为水分胁迫系数，表示水分供应充足情况，当供水不充分时，作物生长消耗根区内土壤水分，直至消耗量大于水分亏缺阈值时，水分胁迫系数将小于1，导致作物实际蒸腾蒸发量小于充分蒸发蒸腾量，即发生减产；TAW为作物根系土壤层总可利用水量，Dr为已消耗的土壤水量，mm；RAW为无水分亏缺状态下可利用水量；θ_{FC}和θ_{WP}分别为田间持水率和凋萎点，%；p为系数，表示土壤水分可利用程度，与计算时段内日均ETc及作物种类有关，p'_l为世界农粮组织推荐的参考值；H为根区土壤深度。

(2)约束条件。

①作物种植面积约束。充分尊重当地作物种植习惯是种植结构优化方案得以落实的关键，作物种植面积约束如式(7)和式(8)所示：

$$\sum_{l=1}^{N_1}x_l=A \tag{8}$$

$$x_{\min}<x<x_{\max} \tag{9}$$

式中：A为总灌溉耕地面积，km²；$x_{\min}$为作物可种植面积下限，km²；$x_{\max}$为作物可种植面积上限，km²，为使优化结果更符合地区实际情况，将种植面积下限设置为该作物现状种植面积的60%，上限

设置为140%。

②土壤水分平衡约束。任意时段内作物根区土壤水分遵循土壤水分平衡方程，同时土壤可利用水分不可大于田间持水量，且不能低于凋萎点含水量。

$$W_\tau + Pe_\tau - ETa_\tau + In_\tau + W_{\Delta H} + G_\tau = W_{\tau+1} \tag{10}$$

$$H_\tau\theta_{WP} < W_\tau < H_\tau\theta_{FC} \tag{11}$$

式中：τ为计算时段；W为时段初土壤含水量，mm；Pe为时段有效降雨量，mm；In为时段净灌溉水量，mm；$W_{\Delta H}$为根区土壤含水量因作物生长而发生变化的部分，mm；G为根区吸收利用地下水量，mm。

③水资源约束。时段灌溉水量和年灌溉水量不可超过时段可供水量和年可供水量。

$$\begin{cases} \sum\limits_{l,\ \tau} In_l^\tau x_l/\eta \leqslant Wa^t \\ \sum\limits_{l,\ \tau,\ t} In_l^\tau x_l/\eta \leqslant \sum\limits_t Wa^t \end{cases} \tag{12}$$

式中：t为供水过程时间尺度；η为灌溉用水效率；Wa为时段内水资源系统可用于灌溉的水量，万m^3。

2.2 供水侧模型 供水侧模型包括多水源配置模型、湖库调度模型两部分。前者以不同用户需水量和不同水源可供水量为输入，按照一定的规则和目标实现多个水源在不同用户之间的合理分配；后者把水资源系统缺水量(初始计算时，系统缺水量等于需水量)，作为湖库调度模型的附加需水量，输入湖库调度模型，进一步优化水库调度图，实现配置与调度的紧密结合。

2.2.1 *多水源优化配置模型* 首先对流域水资源进行分区，并将其概化为由水源、用水户和传输系统构成的网络图，进而根据制定的模拟规则实现对水资源系统供-用-耗-排的全过程模拟。将水源分为水库水、河网水、地下水、再生水、外调水五大类。其中，水库水又分为聚合水库、中型水库和大型水库。用水户包括生活、农业、工业和生态四大用户；传输系统概化为四类，包括地表水传输系统、地下水库之间的测渗补给与排泄系统、外调水传输系统以及污水再生利用传输系统。水源和用户间的匹配关系，通过开关矩阵实现。聚合水库(多个小型水库、塘坝的聚合体)、中型水库、地下水库采用标准规则(Standard Operation Procedure，SOP)进行模拟[22-23]。大型水库或湖泊，一般是流域水资源系统的控制性蓄水工程，是优化调节的主要对象，本研究采用多目标离散对冲供水调度规则进行模拟[13,20]。

(1)目标函数。多水源优化配置模型以系统缺水量最小为目标函数，具体可表示为：

$$g = \min\sum_j \alpha_j \left(D_j - \sum_i O_i^j W_i^j \right) \tag{13}$$

式中：i为水源序号，j为用户序号；α为用户的重要性权重；D为用户需水量，万m^3；W_i^j为水源i向用户j的供水量，万m^3；O_i^j为水源i与用户j之间的连接关系，取0或1；当取0时，表示水源i不能向用户j供水；以O_i^j为元素的矩阵$\boldsymbol{O}$即为开关矩阵。

(2)约束条件。

①可供水量约束。水源i供给各用户的水量之和不能超过时段内该水源的可供水量和供水能力：

$$\sum_j W_i^j \leqslant \min\left(Ws_i,\ Ws_{maxi}\right) \tag{14}$$

式中：Ws为时段内水源的可供水量，万m^3；Ws_{max}为水源输水能力，万m^3。

②需水量约束。各水源向同一个用户的供水量之和不可超过该用户的需水量：

$$\sum_i W_i^j \leqslant D_j \tag{15}$$

2.2.2 *湖库优化调度模型* (1)湖库多用户离散对冲规则。根据水库供水对象和优先级设置若干条供水限制线将库容分为多个分区，假如水库供水用户优先级为生活→工业→生态→农业(→表示优先

于），则需从上到下依次设置4条限制线，这4条限制线与库容上限（正常蓄水位或汛限水位）、库容下限（死水位）一起，把库容分为5个区。当水库水位高于某一限制线时，完全满足对应用户需水；当水库水位低于该限制线时则限制向该用户供水[15,23]。记$S_{i,\ t}$（i=1，2，3，4分别表示生活、工业、生态、农业用户，t=1，2，…，N）为t时段内第i个用户的供水限制线，任意时段满足

$$S_{\min} < S_{1,t} < S_{2,t} < S_{3,t} < S_{4,t} < S_{\max} \tag{16}$$

式中：$S_{\min}$、$S_{\max}$分别为水库允许最小库容和允许最大库容。记水库时段初始库容为V_t、α_1、α_2、α_3、α_4分别为对应不同用户的供水限制系数，取值范围为[0，1]，那么离散对冲供水规则如下：

①$S_{4,t}<V_t<S_{\max}$，每个用户按照需水进行供水，$Wl_t=Dl_{1,t}+Dl_{2,t}+Dl_{3,t}+Dl_{4,t}$

②$S_{3,t}<V_t<S_{4,t}$，限制用户优先级最低的农业供水，其他用户正常供水，$Wl_t=Dl_{1,t}+Dl_{2,t}+Dl_{3,t}+\alpha_4 Dl_{4,t}$

③$S_{2,t}<V_t<S_{3,t}$，限制生态与农业供水，其他用户正常供水，$Wl_t=Dl_{1,t}+Dl_{2,t}+\alpha_3 Dl_{3,t}+\alpha_4 Dl_{4,t}$

④$S_{1,t}<V_t<S_{2,t}$，限制工业、生态与农业供水，正常向生活供水，$Wl_t=Dl_{1,t}+\alpha_2 Dl_{2,t}+\alpha_3 Dl_{3,t}+\alpha_4 Dl_{4,t}$

⑤$S_{\min}<V_t<S_{1,t}$，限制所有用户正常供水，$Wl_t=\alpha_1 Dl_{1,t}+\alpha_2 Dl_{2,t}+\alpha_3 Dl_{3,t}+\alpha_4 Dl_{4,t}$。

需指出的是，也有研究以水库初始库容与时段来水之和，即$V_t+q_t\Delta t$，作为限制用户供水的判断条件的。

（2）目标函数。以缺水量与水库弃水量加权之和最小作为湖库调度模型目标函数

$$h=\min\left(\left(\beta_1\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}Dl_{i,j}^{t}-\sum_{k=1}^{K}Wl_{i,j,k}^{t}\right)+\beta_2\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}Sp_k^t\right) \tag{17}$$

式中：k为水库序号；$Dl_{i,j}^{t}$为单元i用户j时段t的需水量，万m³；$Wl_{i,j,k}^{t}$为水库k时段t向单元i用户j的供水量，万m³；Sp_k^t为水库k时段t的弃水量；β_1与β_2为权重系数，本研究中认为保证供水比弃水更重要，采用基于信息熵的AHP方法[23]获得权重系数分别为0.75和0.25。

（3）约束条件。①水库供水限制库容约束。根据水库对用户供水的优先级，水库供水限制限即决策变量，满足如下约束

$$S_{\min}(k)<S_{1,t}^{k}<S_{2,t}^{k}<S_{3,t}^{k}<S_{4,t}^{k}<S_{\max}(k) \tag{18}$$

式中：$S_{1,t}^{k}$、$S_{2,t}^{k}$、$S_{3,t}^{k}$、$S_{4,t}^{k}$分别为水库k时段向生活、工业、生态、农业供水的库容限制线，$S_{\min}(k)$和$S_{\max}(k)$分别为水库k的下限库容和上限库容。

②水库水量平衡约束

$$V_{k,t+1}=V_{k,t}+Win_{k,t}-\sum_j Wl_{i,j,k}^{t}-Sp_{k,t}-Wloss_{k,t} \tag{19}$$

式中：$V_{k,t}$、$V_{k,t+1}$、$Win_{k,t}$分别为水库k时段t初始库容、末库容、水库入流或区间入流；$Sp_{k,t}$和$Wloss_{k,t}$分别为水库弃水、蒸发渗漏损失。

2.3 模型分层求解

（1）需水侧模型。模型决策变量数目多，属于非线性复杂优化问题，采用遗传算法（Genetic Algorithm，GA）[24]进行求解。遗传算法主要参数设置如下：种群规模N=300、交叉概率pc=0.8、变异率pm=0.02、演化代数T=2000。通过优化可得到农业需水过程，并与通过预测得到的生活、工业、生态用户需水共同组成了流域需水过程。

（2）供水侧模型。多水源配置模型，采用线性规划或遗传算法求解。湖库调度模型采用遗传算法和轮库轮线迭代算法相结合的途径进行求解，首先利用遗传算法产生多组水库初始调度图（不同用户供水限制线），然后针对某个水库按优先级从高到低的顺序逐次优化每条限制线，在优化某条限制线时，其它限制线保持不变；所有限制线优化完之后，再优化下一个水库。经过多次迭代计算逼近最优解，直到前后两次计算的目标函数小于设定的阈值时停止计算。通过优化可得到多水源供水过程和水库调度图。

（3）实现过程。①启动需水侧模型。以现状农业供水过程为输入，以灌溉经济净效益最大为目标函数，通过优化农业种植结构和灌溉水量，给出农业需水过程。②将农业需水过程，连同其它用户

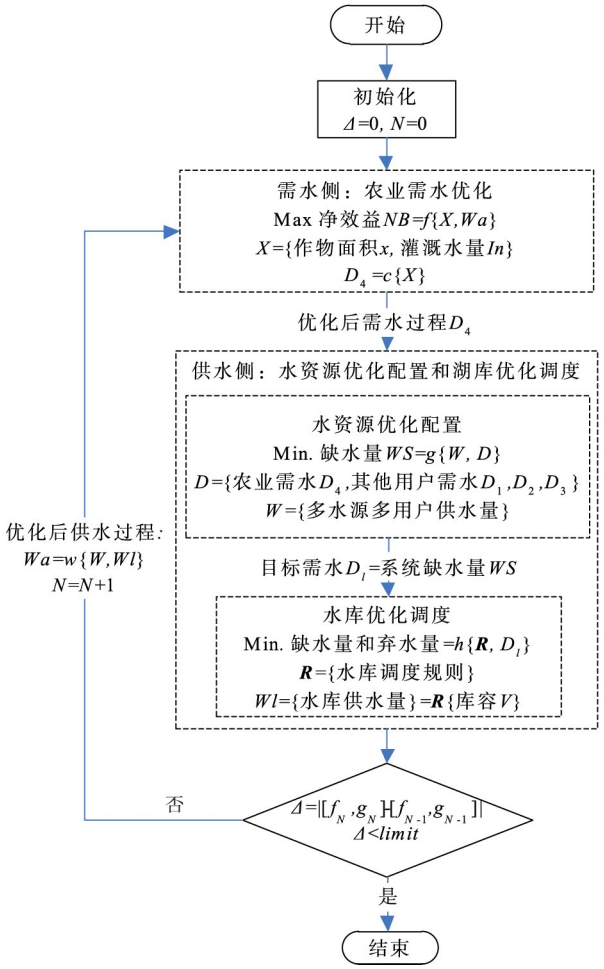


图2　流域水资源供需双侧模型

需水过程，作为供水侧模型的输入，启动供水侧模型，给出向不同用户的可供水过程。③把②给出的可供水过程，替换原供水过程，重新启动需水侧模型。如此反复循环，直至前后两次迭代的目标函数值之差小于设定的阈值，停止计算。统计分析计算结果，提出流域作物种植结构、水资源配置方案和湖库供水调度图。求解框图详见图2。

3　实例应用

3.1　南四湖流域概况　南四湖流域隶属淮河流域沂沭泗水系，位于山东、江苏、河南、安徽四省交界地区，由4个串联湖泊组成，故称南四湖，是我国北方最大的淡水湖，同时也是南水北调东线工程重要的调蓄场所。南四湖流域面积为3.17万 km^2，人均水资源占有量不足300 m^3，属于严重缺水地区。

从需水侧角度来看，流域内农业用地面积占总面积的80%左右，农业灌溉是流域内最大的用水户，农业用水占总用水量的80%以上。随着社会经济发展，流域内水资源供需缺口逐年增大，农业用水和其他用水之间的矛盾日益剧烈。南四湖流域属温带大陆性季风气候，四季分明，气候温和，多年平均气温13.7 ℃，具有明显雨热同期的季风性气候特点。降水时空分布不均，湖东地区降水量大于湖西地区，汛期降水超过全年降水的70%。流域现状灌溉耕地面积为11 313 km^2，湖西7947.5 km^2，湖东3365.5 km^2，本次研究考虑的主要种植作物包括小麦、玉米、水稻、大豆、棉花，其中小麦和玉米占总面积的75.2%，水稻主要分布于湖周和南部徐州市境内。

从供水侧角度来看，南四湖流域水系复杂，水利工程多，由二级坝分割开来的南四湖梯级水库

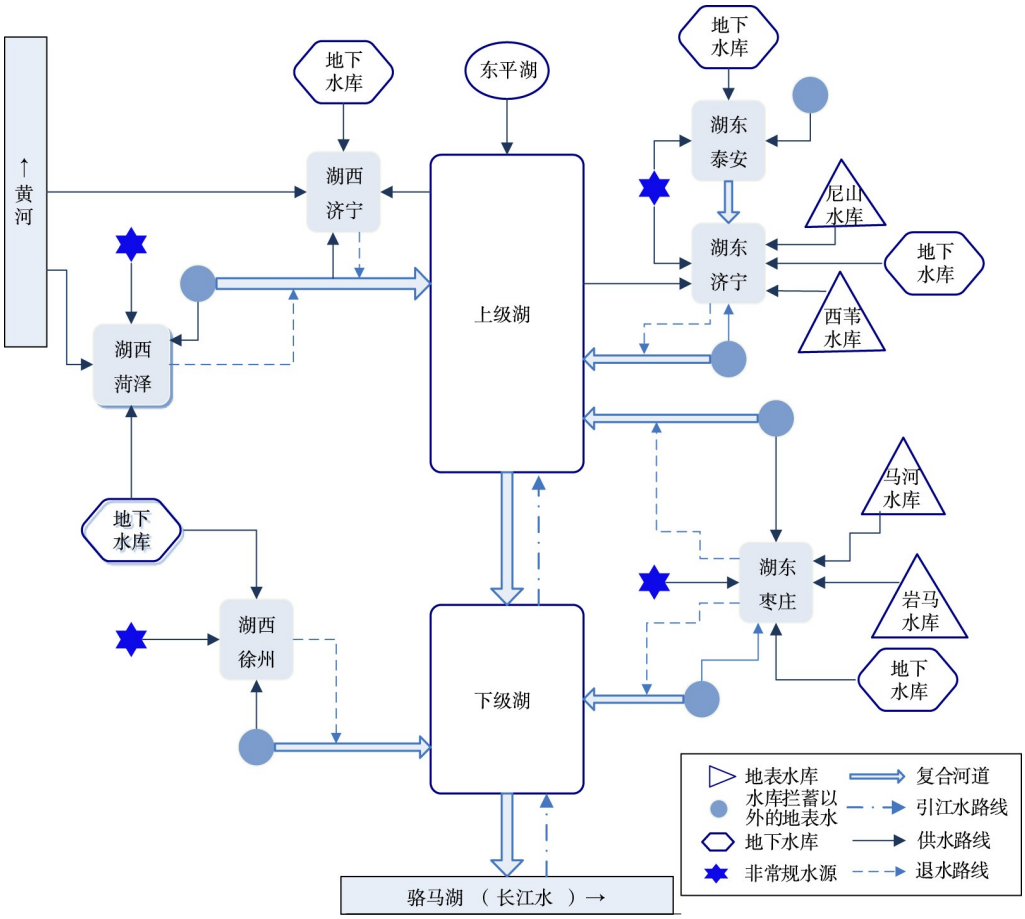


图3　南四湖流域水资源系统概化图

（上级湖、下级湖）是流域控制性工程。上级湖正常蓄水位34.2 m，死水位33.0 m，兴利调节库容5.8亿m^3；下级湖正常蓄水位32.5 m，死水位31.5 m，兴利调节库容为4.6亿m^3。此外，湖东山丘区还建有尼山、西苇、马河和岩马4座大型水库和7座中型水库。供水水源包括河网、地表水库、地下水库，还有引黄水、引江水、非常规水等，包括湖西徐州、河西菏泽、湖西济宁和湖东泰安、湖东济宁和湖东枣庄6个计算单元，水资源系统概化图见图3。

3.2　方案设置和数据

3.2.1　*方案设置*　为了更好的说明模型在水资源短缺严重情况下的表现，采用1956—2010年水文长系列模拟计算，并进一步选择平水年和枯水年情景进行统计分析。需水侧模型以旬为时间尺度，决策变量为小麦、玉米、水稻、大豆、棉花在不同分区内的种植面积和不同时段内的灌溉水量；多水源配置模型以月为时间尺度，决策变量为时段内不同水源向不同用户的供水量；湖库调度模型同样以月为时间尺度，决策变量为水库群调度规则，即南四湖上级湖和下级湖的面向不同用户（生活、农业、工业）的库容限制线和供水限制系数。

3.2.2　*数据来源与处理*　所需数据包括流域各水源可供水量数据、大型水库月入库径流数据、流域内生活、工业和生态用户月需水数据、水利工程供水能力数据、逐日气象数据；作物生长特性数据、土壤数据、灌溉水价等。（1）水源数据。据统计，流域地表水75%和50%保证率可供水量分别为10.49亿m^3和14.58亿m^3，外调水75%和50%保证率可供水量分别为15.65亿m^3和15.74亿m^3（含引黄水和引江水），地下水多年平均可开采量为36.62亿m^3，非常规水源可供水量为8157万m^3。水库逐月入库径流。（2）需水数据。生活、工业和河道外生态需水分别为7.98亿m^3、9.56亿m^3和0.79亿m^3，河道内生态需水按Tennant方法、多年平均流量10%确定18条入湖河流的生态需水量为1.64亿m^3。模型计算时按各分区范围输入需水数据。（3）供水数据。现状条件下蓄水、引水、取水和机电井工程供水能

表 1　作物单位成本和收益取值

	计算分区	小麦	玉米	水稻	棉花	大豆
效益 Pc/(元/kg)	湖东枣庄	2.76	2.76		28.92	6.41
	湖东泰安	2.88	2.93		15.39	7.67
	湖东济宁	2.93	2.79	3.77	26.72	7.07
	湖西徐州	2.60	2.69	1.75	27.24	6.69
	湖西济宁	2.46	2.62	3.49	25.56	6.99
	湖西菏泽	2.34	2.30	3.43	19.37	5.52
单产 Ya/(kg/km^2)	流域	900	1136	1291.1	214.2	386.3
成本 C/(元/hm^2)	流域	15114	14384	14585	39711	10702

注：效益数据来自各市统计年鉴；成本数据来自《全国农产品资料汇编》，为物质费和人工费之和扣除水费。

力分别为 7.53 亿 m^3、17.12 亿 m^3、11.25 亿 m^3 和 38.31 亿 m^3，总供水能力为 74.22 亿 m^3。(4)气象数据。根据 Penman 公式，采用逐日气象资料计算参考蒸腾蒸发量，包括日最高气温，最低气温，近地面风速，短波辐射，比湿，气压，降雨等。(5)作物数据。计算作物需水量的作物系数和模拟作物产量的水分敏感指数参考有关文献试验数据成果[25-32]，作物生长期根区深度、作物最大单位产量和作物单价根据各地区实际情况进行统计，部分取值见表 1。(6)其他数据。灌溉水价取 0.25 元/m^3，土壤田间持水量和凋萎点数据根据地区土壤特性确定。

3.3　结果分析讨论　利用流域水资源供需双侧调控模型，进行长系列(1956—2010)模拟计算。多次试验均表明，协调 3 次之后，第 4 次协调结果与第 3 次协调结果(系统缺水量、灌溉净效益等)相差很小，且第 3 次协调结果水分效益最高，终止计算。图 4 是不同协调次数多年平均效益与灌溉供水平衡关系，该图表明随着供需双侧协调优化，灌溉需水逐步减少，而灌溉供水量则逐步提升增加，达到了通过供需双侧协调优化，缩小供需缺口的目的。

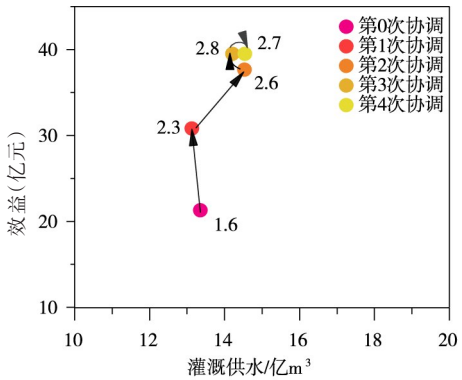


图 4　优化前后灌溉效益和用水量变化

图 5 是枯水年(75%)和平水年(50%)不同来水情景下，灌溉供水量及其效益与原始灌溉需水量，随协调次数的对比关系。该图表明，(1)当协调次数为 0，即供需双侧不协调时，灌溉效益较小(平水年 21.27 亿元，枯水年 20.74 亿元)，但灌溉需水量很大(平水年 15.70 亿 m^3，枯水年 19.20 亿 m^3)；(2)随着协调次数增加，种植结构逐步优化和水利工程调度规则逐步完善，灌溉效益有较大提升(优化后平水年 39.46 亿元，枯水年 39.13 亿元)，总水分生产效益持续增加，平水年和枯水年分别由 0.77 元/m^3、0.69 元/m^3 增加到 1.40 元/m^3、1.39 元/m^3。

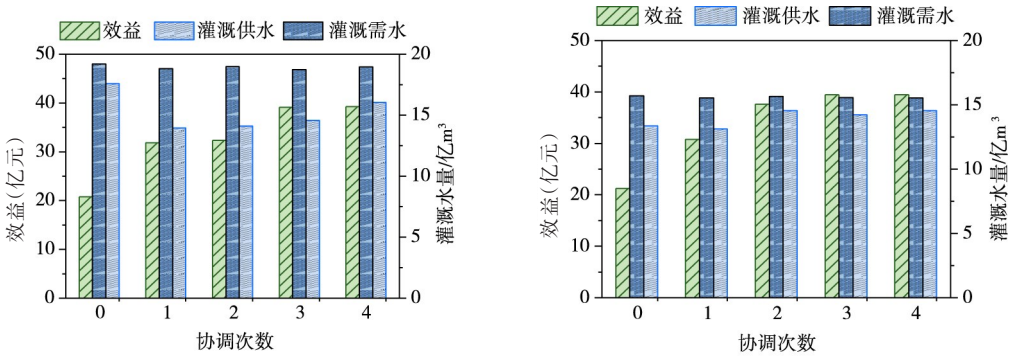


图 5　不同年型灌溉效益随协调次数的变化

此时，南四湖上级湖和下级湖优化调度图如图6所示。南四湖梯级水库优化调度图，按照生活、工业、生态和农业等四类用户由低到高的优先顺序，把湖泊库容分成了5个区间，可更好地指导水库有序运行。模拟结果表明，流域生活、工业供水保证率稳定在95%，生态供水保证率由53%提高到71%，农业供水保证率由67%提高到75%，综合供水保证率由78.1%提高到84.6%，经济社会效益显著。流域不同分区优化前后供需情况见表2，通过模型优化需水、供水和水库工程调度方式实现了有限水资源在不同分区间的合理调配，在实现流域综合供水保证率由78.1%提高至84.6%的同时，不同分区综合供水保证率更加趋于均衡，体现了水资源配置的公平性。

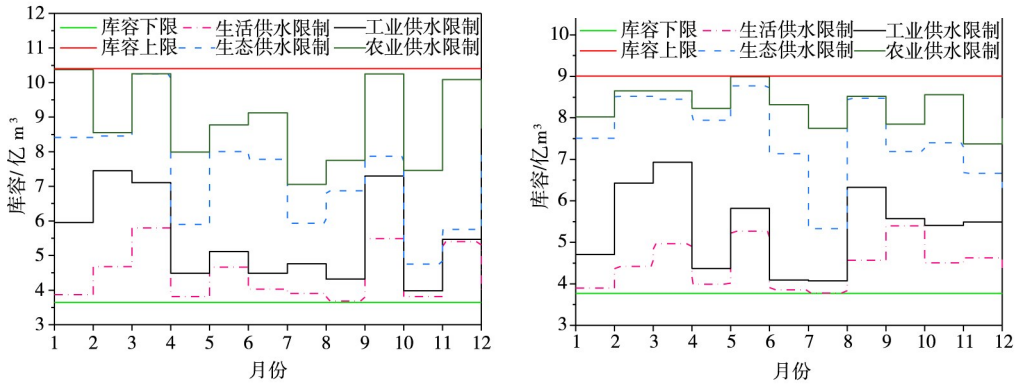


图6　南四湖上下级湖供水调度图

表2　优化前后流域不同分区供需情况对比　　（单位：亿 m^3）

分区	优化前			优化后		
	供水	需水	供水保证率/%	供水	需水	供水保证率/%
湖西徐州	8.58	9.69	85	7.11	8.55	83
湖西菏泽	21.63	26.01	83	20.80	26.91	77
湖西济宁	8.42	8.96	94	11.20	11.54	97
湖东泰安	2.04	2.22	92	1.90	2.11	90
湖东济宁	8.84	15.92	56	7.29	9.92	73
湖东枣庄	3.46	5.89	59	4.43	4.84	92
南四湖流域	52.97	68.69	78.1	52.73	63.87	84.6

优化后种植结构结果见表3和图7。在枯水年情景下，仅湖东泰安小麦种植面积增加43.8 km^2，流域其他分区小麦种植面积减少9.0～414.9 km^2。其余作物的种植面积在大部分地区有所增加，仅湖东泰安的玉米种植面积减少42.4 km^2，棉花减少0.6 km^2，大豆减少0.8 km^2，湖西徐州水稻种植面积减少了28.0 km^2，湖西济宁大豆种植面积减少4.7 km^2。从流域整体来看，小麦种植比例减少8.22%，玉米和棉花种植比例增加较为明显，分别为3.75%和3.66%，水稻和大豆种植比例分别增加0.35%和0.46%；平水年情景下流域种植结构变化趋势与枯水年结果类似，其中湖东泰安与湖东枣庄地区与枯水年情景结果一致，总体而言小麦种植比例减少7.03%，玉米、水稻、棉花和大豆种植比例分别增加2.22%、1.33%、2.65%和0.83%。此外，通过计算种植结构优化前后作物生长期内的有效降雨量表明（见表4），平水年和枯水年分别多利用了降雨0.48亿 m^3和0.32亿 m^3。优化结果显示，流域种植结构变化幅度不大，既保证了原有的种植习惯，又能实现效益的提升。为了追求更高的经济效益和节水效益，模型趋向于将有限的水资源分配给效益更高的作物，地区间的差异，体现了时段可供水量的约束力，特别是随着最严格水资源管理制度和节水型社会建设等政策的实施，每个月供给农业灌溉的水量将受到越来越严格的约束。

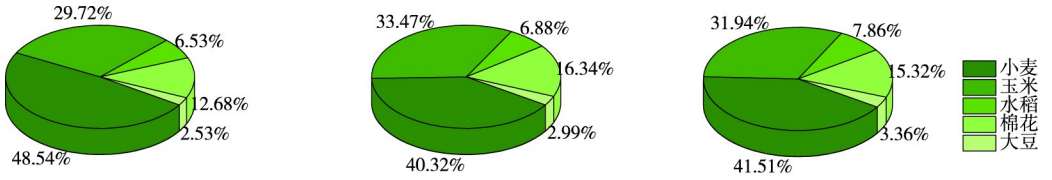
通过模型优化，将部分水土资源分配给灌溉需水量更少的玉米、棉花和大豆，充分地利用降水，确保作物发育关键期的需水要求，提高灌溉水利用效率，可实现枯水年情景下流域水分净效益

表3　流域种植结构优化前后对比　　（单位：km^2）

	优化前					优化后(枯水年)					优化后(平水年)				
	小麦	玉米	水稻	棉花	大豆	小麦	玉米	水稻	棉花	大豆	小麦	玉米	水稻	棉花	大豆
湖东枣庄	263.3	237.1	0	7.2	11.4	254.3	238.6	0	10.0	15.9	254.3	238.6	0	10.0	15.9
湖东泰安	142.5	106.1	0	1.5	2.0	186.3	63.6	0	0.9	1.2	186.3	63.6	0	0.9	01.2
湖东济宁	825.5	644.0	96.1	47.4	37.0	752.1	648.7	133.4	65.2	50.6	753.1	644.2	134.5	66.4	51.8
湖西济宁	308.1	130.0	277.4	27.4	35.5	259.1	181.9	249.4	38.3	49.7	251.8	170.3	281.4	36.7	38.1
湖西徐州	499.8	193.2	133.4	368.0	39.5	302.5	261.8	148.7	486.3	34.7	381.5	269.5	185.6	343.1	54.3
湖西菏泽	2093.4	1219.7	49.4	628.0	90.1	1678.5	1454.7	54.2	790.5	102.5	1707.5	1332.9	67.9	847.5	124.7
流域合计	4132.5	2529.9	556.3	1079.4	215.5	3432.7	2849.3	585.7	1391.2	254.7	3534.4	2719.1	669.4	1304.7	286.1

表4　流域种植结构优化前后生育期内有效降雨情况变化　　（单位：亿m^3）

	优化前	优化后	差值
平水年	13.50	13.98	0.48
枯水年	13.15	13.47	0.32



（a）优化前　（b）优化后（枯水年）　（c）优化后（平水年）

图7　不同年型优化前后种植结构变化

由0.69元/m^3提升至1.39元/m^3，平水年情景下水分净效益由0.77元/m^3提升至1.40元/m^3。表明模型通过优化水资源和耕地资源在不同作物间的分配，以及完善湖库调度方式，既可提高农民收入，又能保障水资源可持续利用。

4　结论

为解决现有水资源调控模式供需分离、配置与调度不结合，难以支撑水资源严格管理和集约化开发利用的问题，本文研究建立了流域水资源供需双侧调控模型，阐述了模型框架和建模步骤，并以南四湖流域为例开展了应用研究，得到适应流域来水条件的农业种植结构、水资源配置方案和梯级水库调度图；从灌溉效益、灌溉水量和流域供水保证率等方面分析了优化结果的合理性和有效性。

提出的流域水资源供需双侧调控模式，较水资源常规配置模式，既能体现有限水资源条件下的需水适应性调整，也更能有效发挥工程对水资源的调控能力，提升经济效益和社会效益。南四湖流域在不改变现状灌溉面积的情况下，枯水年流域水分效益提升了0.7元/m^3，平水年灌溉水分效益提升了0.63元/m^3，流域供水保证率由78.1%提高到84.6%，表明了所提出模型的有效性和合理性。

需指出的是，本文建立的流域水资源供需双侧调控模型是初步的，未来还需要从如下几个方面对功能加以完善：(1)模型可分析计算水文典型年、历史长系列情景下流域水资源供需双侧在提升水资源配置效率和效益中的表现，承认了水文序列一致性的假定。然而，受气候变化和人类活动影响，水文一致性受到挑战，因此进一步考虑来水随机性、需水不确定性和水文序列非一致性对计算结果的影响，进而获得鲁棒性更强的种植结构、水资源配置和工程调控方案，是未来需要完善的重要内容。(2)模型在需水侧重点考虑农业需水结构优化问题，对生活、工业和生态用户的需水、节水弹性考虑较少，其需水过程是按照定额法等常规方法确定的。事实上，这些用水户特别是生活和工业用水，也会随管理政策趋紧、水价机制优化与生产设备升级换代，存在一定的节水空间。因此，受管理政策变化的区域需水行为模拟是下一步需要补充完善的。

参 考 文 献：

[1] 王浩，游进军．中国水资源配置30年[J]．水利学报，2016，47(3)：265-271．

[2] 章燕喃，田富强，胡宏昌，等．南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]．水利学报，2014，45(7)：844-849．

[3] 邵玲玲，牛文娟，唐凡．基于分散优化方法的漳河流域水资源配置[J]．资源科学，2014，36(10)：2029-2037．

[4] 郎连和．大连市水资源可持续利用的配置与评价方法研究[D]．大连：大连理工大学，2013．

[5] 桑学锋，赵勇，翟正丽，等．水资源综合模拟与调配模型WAS(Ⅱ)：应用[J]．水利学报，2019，50(2)：201-208．

[6] 齐学斌，黄仲冬，乔冬梅，等．灌区水资源合理配置研究进展[J]．水科学进展，2015，26(2)：287-295．

[7] 付银环，郭萍，方世奇，等．基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J]．农业工程学报，2014，30(5)：73-81．

[8] 张展羽，司涵，冯宝平，等．缺水灌区农业水土资源优化配置模型[J]．水利学报，2014，45(4)：403-409．

[9] 谭倩，缑天宇，张田媛，等．基于鲁棒规划方法的农业水资源多目标优化配置模型[J]．水利学报，2020，51(1)：56-68．

[10] SINGH A，PANDA S N．Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return[J]．Agric．Water Manag．，2012，115：267-275．

[11] ALJANABI A A，MAYS L W，FOX P A．Reclaimed wastewater allocation optimization model for agricultural irrigation[J]．Environ．Nat．Resour．Res．，2018，8(2)：55-68．

[12] GEORGIOU P E，PAPAMICHAIL D M．Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions[J]．Irrig．Sci．，2008，26：487-504．

[13] NOORY H，LIAGHAT A M，PARSINEJAD M，et al．Optimizing irrigation water allocation and multicrop planning using discrete PSO algorithm[J]．J．Irrig．Drain．Eng．，2012，138：437-444．

[14] HU S，WANG Z，WANG Y，et al．Total control-based unified allocation model for allowable basin water withdrawal and sewage discharge[J]．Sci．China Technol．Sci．，2010，53：1387-1397．

[15] WANG Z，ZHANG L，CHENG L，et al．Optimizing operating rules for a reservoir system in Northern China considering ecological flow requirements and water use priorities[J]．J．Water Resour．Plan．Manag．，2020，146(7)：04020051．

[16] 王浩，王旭，雷晓辉，等．梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]．水利学报，2019，50(1)：25-37．

[17] NIU G，LI Y P，HUANG G H，et al．Crop planning and water resource allocation for sustainable development of an irrigation region in China under multiple uncertainties[J]．Agric．Water Manag．，2016，166:53-69．

[18] ARAYA A，GOWDA P H，GOLDEN B，et al．Economic value and water productivity of major irrigated crops in the Ogallala aquifer region[J]．Agric．Water Manag．，2019，214:55-63．

[19] LALEHZARI R，BOROOM，NASAB S，et al．Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern[J]．J．Irrig．Drain．Eng．，2016，142：05015008．

[20] JENSEN M E．Water consumption by agricultural plants[C]//Water Deficits and Plant Growth，Academic Press：New York，1968．

[21] ALLAN G R，PEREIRA L，RAES D，et al．Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage paper 56[M]．Rome：FAO，1998．

[22] OLIVEIRA R，LOUCKS D P．Operating rules for multireservoir systems[J]．Water Resour．Res．，1997，33：839-852．

[23] 王宗志，程亮，王银堂，等．基于库容分区运用的水库群生态调度模型[J]．水科学进展，2014，25(3)：435-443．

[24] GOLDBERG D E．Genetic Algorithms in Search，Optimization and Machine Learning[M]．Addison-Wesley，Boston，MA．1989．

[25] 鲁孟胜，孔凡顺，庄学厚．山东西南部南四湖流域环境地质综合调查[J]．中国地质，2003，30：424-428．
[26] 吴乃元，张廷珠．冬小麦作物系数的探讨[J]．山东气象，1989(3)：38-39．
[27] 陈玉民，郭国双，王广兴，等．中国主要农作物需水量与灌溉[M]．北京：水利电力出版社，1995．
[28] 左余宝，田昌玉，唐继伟，等．鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究[J]．中国农业气象，2009，30：70-73．
[29] 肖俊夫，刘战东，段爱旺，等．棉花分生育期水分生产函数Jensen模型研究[J]．中国棉花，2010，37：11-13．
[30] 肖俊夫，刘战东，段爱旺，等．中国主要农作物分生育期Jensen模型研究[J]．节水灌溉，2008(7)：1-3．
[31] 杨静敬，路振广，潘国强，等．亏缺灌溉对冬小麦耗水规律及产量的影响[J]．节水灌溉，2013(4)：8-11．
[32] 宋雪雷．豫北灌区冬小麦-夏玉米一体化农田耗水规律与灌水效应研究[D]．郑州：河南农业大学，2007．

Modeling of bilateral joint regulation of basin-wide water resources supply and demand

WANG Zongzhi[1], YE Ailing[1], LIU Kelin[1], JIN Juliang[2]
(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*;
2. *College of Civil Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *China*)

Abstract: A model of bilateral joint regulation of basin-wide water resource supply and demand is put forward focusing in the problems of separated water demand and supply, and weak bond of allocation and regulation in conventional water resource allocation, which barely supports the strict basin water resource management. In terms of water demand, an optimal model of crop pattern and irrigation is established based on a function of water and benefits considering constraints of water and land resources. In terms of water supply, a two-stage allocation-regulation-combined and simulation-optimization-based modeling approach is used to develop the multi-water-resource allocation and reservoir operation model. The water demand derived from the former optimal model and the water supply derived from the latter model are coupled and decomposed to establish the integrated model and implement the joint control of water demand and supply. The integrated model is applied in the Nansi Lake Basin and the optimal water allocation scheme, crop patterns and operation rules of upper and lower Lakes are obtained based on the model, which reveals the reasonability of the model. The results under the dry condition and normal condition show that the water production efficiency of irrigation water increased 0.70 yuan/m^3 and 0.63 yuan/m^3 respectively; the guarantee rate of domestic and industrial water supply remained at 95%, and the rate of ecological and agricultural water supply increased from 53% to 71% and 67% to 75% respectively.

Keywords: water resource management; reservoir operation; bilateral water supply and demand; crop pattern; Nansi Lake Basin

（责任编辑：韩　昆）