

# 江苏省南水北调受水区水资源配置

宋丹丹<sup>1</sup>, 杨树滩<sup>2</sup>, 常本春<sup>2</sup>, 曾春芬<sup>1</sup>, 马劲松<sup>1</sup>, 王腊春<sup>1</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210046; 2. 江苏省水利厅 水资源服务中心, 南京 210029)

**摘要:** 在对水资源系统进行模拟分析的基础上, 结合江苏省南水北调受水区水文水资源、水利工程等特点, 构建流域降雨径流模型、水动力学模型、水量调配模型以及水工程调度模型等子模型, 对受水区水资源量、供需水量等进行研究。基于所建模型提出水利工程调度方案, 对研究区水资源进行合理配置。分别模拟计算分析研究区内农业、工业、生活、生态和船闸用水户在现状与规划工情下不同水平年的供水、需水、缺水情况, 制定水资源配置方案。通过现状与规划方案对比可知, 南水北调一期工程建成后供水能力提高, 缺水量显著降低。95%、75%和50%保证率下, 缺水率分别降低10.3%、8.0%和5.2%。研究成果为南水北调东线水利工程调度提供科学依据, 对跨流域调水工程的水资源配置与调度具有一定参考意义。

**关键词:** 水资源; 水量调配; 模型模拟; 供需水; 南水北调东线; 水资源配置; 水工程调度

**中图分类号:** TV213    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0417-05

## Research of water resources allocation of Jiangsu intake district of South to North Water Transfer Project

SONG Dan dan<sup>1</sup>, YANG Shu tan<sup>2</sup>, CHANG Ben chun<sup>2</sup>, ZENG Chun fen<sup>1</sup>, MA Jin song<sup>1</sup>, WANG La chun<sup>1</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

2. Service Center of Water Resource of Jiangsu Province Water Conservancy Bureau, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** On the basis of water resources system analysis and characteristics of hydrology and water conservancy projects, the precipitation and runoff model, hydrodynamic model, water quantity allocation model, and water project scheduling model were constructed to investigate the water resources quantity and water supply and demand in the river basin. Water conservancy project scheduling scheme was proposed based on the constructed models and applied to perform reasonable allocation of water resources in the study area. The water supply, water demand, and water deficit in agriculture, industry, life, ecology, and lock under the current and planning engineering conditions were simulated, and the corresponding allocation schemes of water resources were established. Through the comparison between the current and planning conditions, water supply capacity can increase while water deficit can decrease after the implementation of the first stage of the South to North Water Transfer Project. Under the assurance rates of 95%, 75%, and 50%, annual water deficit rate decreases by 10.3%, 8.0%, and 5.2%, respectively. The research can provide scientific reference for the water conservancy project scheduling in the Eastern Route of the South to North Water Transfer Project, and is of significance for the water resources allocation and scheduling of the inter-basin water conservancy project.

**Key words:** water resources; water allocation; model simulation; water supply and demand; Eastern Route of the South to North Water Transfer Project; water resources allocation; water project scheduling

水资源是人类生存和发展的重要战略性资源, 水资源短缺、时空分布不均以及水资源利用率较低等现象已成为制约我国社会发展的重要因素。水资源配置的研究对于缓解水资源供需矛盾、促进区域社会发展有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

水资源配置涉及工程、经济、技术和管理等多个方面, 本文中水资源配置指的是在一定区域内, 通过工程与非工程措施, 对有限的不同形式的水资源进行科学合理的分配, 从而提高水资源利用效率和分配效率, 以满足不同层次、不同目标、不

收稿日期: 2014-07-16    修回日期: 2015-04-14    网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1521.010.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB05B01-3); 国家自然科学基金青年科学基金项目“基于数据融合的极端气候条件下水资源模拟与优化配置研究”(41401021); 江苏省水利科技项目“江苏省南水北调受水区水量调配与考核关键技术研究”(2014016)

作者简介: 宋丹丹(1990), 女, 山东淄博人, 主要从事水资源水环境方面研究。E-mail: luyashan.baby@163.com

通讯作者: 王腊春(1963), 男, 江苏金坛人, 教授, 主要从事水文水资源及水环境方向研究。E-mail: wang6312@263.net.cn

同用水户的用水需求<sup>[3]</sup>。

对水资源配置模型的研究一般有优化和模拟两种方法,前者通过构建目标函数、设置约束条件,综合各类效益得到最优解<sup>[4-8]</sup>;后者结合专家经验针对实际发生的过程进行描述和概化,适合构建输入输出式的系统响应结构<sup>[9-10]</sup>。在模拟模型研究方面,国外比较成熟的系统模拟软件有 Aqarius、MIKEBASIN、WMS、Waterware 等,因其适用范围广、集成性和可操作性强等特点得到广泛应用<sup>[11-12]</sup>。国内研究多是以具体实例为研究对象,以实际问题的分析和解决为导向,应用范围较小,所开发的模型往往是以某方面需求为导向的个性化模型,还不具备通用性。微观性模型难以综合描述整个区域或流域的各项水量转化,而宏观性模型又缺乏水动力机理,不能准确反映水资源时空分布过程,所以能反映宏观物理过程并满足实际需求的模拟技术是研究水资源系统的必然发展趋势<sup>[13-16]</sup>。

以往南水北调工程水资源配置模型的研究多集中于宏观尺度水量调配上,与用水户实际微观需求存在一定脱节,普适性、实用性和可操作性不强。随着南水北调东线工程的建设运行,针对江苏省受水区水资源配置的研究十分紧迫。本文基于微观层面用水户需求,以提高水资源利用效率和分配效率为目的,采用模型模拟技术,通过建立流域降雨径流模型、水动力学模型、水量调配模型等子模型,估算江苏省南水北调受水区供需水量,提出适用于该地区的现状与规划两种工情下不同年型的水资源调配方案,并进行方案对比,对进一步研究水资源优化配置和南水北调工程运行具有重要的科学意义和应用价值。

## 1 研究区概况

研究区介于 117°57' E-119°34' E, 32°27' N-34°50' N 之间,包括江苏省淮安、宿迁、徐州、连云港市所有辖区,以及扬州市江都、高邮、宝应县(市)和盐城阜宁县,总面积 43 143.7 km<sup>2</sup>,总人口约 2 400 万人。研究区属亚热带和暖温带过渡地带,年平均气温 14℃~17℃,多年平均降雨量 700~1 300 mm,蒸发量 900~1 100 mm。区域地形平坦开阔,湖荡众多、河网密布。自南向北,主要调蓄湖泊有高邮湖、白马湖、洪泽湖、骆马湖和南四湖下级湖五个湖泊,主要输水河道有里运河和苏北灌溉总渠、中运河和徐洪河、韩庄运河和不牢河等,见图 1。

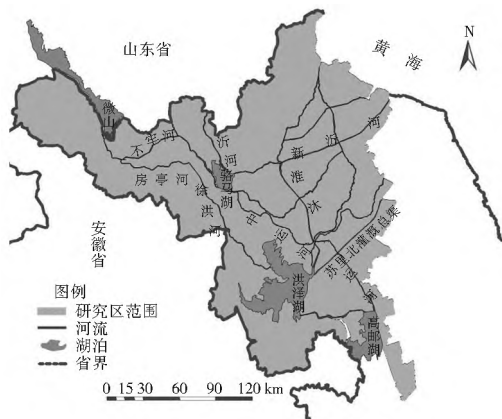


图 1 江苏省南水北调受水区范围示意图

Fig. 1 Jiangsu intake district of South to North Water Diversion Project

## 2 水资源配置研究

### 2.1 模型构建思路

首先,调查收集降雨、蒸发、下垫面属性、河网特征、闸站属性及调度、用水户类别及分布等基础信息,构建基础数据库。其次,进行供水网络概化,包括河道、节点和湖泊概化。其中,河道被概化为输水干线、输水支线和其他河道;河道节点被概化为闸站枢纽节点、用水户节点、管理节点、边界节点以及普通河道节点等。接着,分别构建产、汇流、水资源供需计算、水资源调度等子模型,并对各子模型进行耦合。其中构建产流模型时,将下垫面分为水面、水田、旱地和城镇道路分别进行模型的构建;研究区汇流计算分为平原区、山丘区和湖泊水面汇流,平原区汇流采用汇流曲线法,山丘区采用单位线法,湖泊直接汇流<sup>[17]</sup>。最后,率定模型参数并进行模型验证。

### 2.2 产汇流模型

#### (1) 水面产流。

水面产流为降雨量与蒸发量之差,若降雨量小于蒸发量则产流为负值,计算公式如下:

$$R_w = P - \beta E$$

式中: $R_w$  为水面产流量, $P$  为降雨量, $E$  为蒸发量, $\beta$  为水面蒸发折算系数。

#### (2) 水田产流。

作物生长不同阶段对控制水深的要求不同,因此水田产流也有所不同。水稻生长期分为秧田期、泡田期和生育期,其中秧田期历时较短,按旱地产流模式计算;泡田期按水面产流模式计算;生育期按水田产流模式计算;年内其他时间按照旱地产流模式计算。水稻生育期时段初水深  $H_0$ ,时段末水深  $H$ ,适宜水深下限  $H_{\min}$ ,适宜水深  $H_{\text{mid}}$ ,耐淹水深  $H_{\max}$ ,水稻各生长期需水系数  $\alpha$ ,水面蒸发折算系数  $\beta$ ( $\beta = \text{大水面蒸发量}/E_{601}$  蒸发器蒸发量),降雨量为  $P$ ,蒸发量  $E$ ( $E_{601}$  型蒸发皿数值),水稻田日渗漏量  $F$ 。当时段末水深低于水稻适宜水深下限时,产流为负值,需进行灌溉,灌溉至适宜水深;当时段末水深介于水深下限和耐淹水深之间时,水田不产流;当时段末水深超过水稻耐淹水深时,水田产流。水田产流计算公式如下:

$$\text{令 } H = H_0 + P - \alpha\beta E - F$$

$$\text{若 } H \leq H_{\min}, \text{ 则 } R_f = H - H_{\text{mid}}, \text{ 令 } H = H_{\text{mid}}$$

$$\text{若 } H_{\min} \leq H \leq H_{\max}, \text{ 则 } R_f = 0$$

$$\text{若 } H \geq H_{\max}, \text{ 则 } R_f = H - H_{\max}, \text{ 令 } H = H_{\max}$$

#### (3) 旱地产流。

对于旱地产流可采用单层蓄满产流模型来计算。模型的旱地产流模块中,以饱和含水量和田间持水量为界限划分地表与地下产流。初始时刻土壤含水量为  $W$ ,饱和含水量为  $W_b$ ,饱和含水量最大值为  $W_{bM}$ ,田间持水量为  $W_m$ ,田间持水量最大值为  $W_{mM}$ ,流域平均需水量为  $W_M$ ,流域平均需水量最大值为  $W_{mM}$ ,降雨量为  $P$ ,雨期时段蒸发量为  $E$ ,旱地蒸发量为  $EE$ ,蒸发折算系数为  $K$ ,蓄水容量曲线指数为  $B$ ,旱地地表产流为  $R_s$ ,旱地地下产流为  $R_u$ 。旱地产流模式计算公式如下:

令  $W_b = W_m \times 1.2$ ,  $W_{MM} = W_M(1+B)$ ,  $W_{bM} = W_b(1+B)$ ,  $W_{mM} = W_m(1+B)$ , 又  $A = W_{MM}[1 - (1 - \frac{W}{W_M})^{\frac{1}{1+B}}]$

若  $W > W_M$ , 则  $EE = K \times E$

若  $W \leq W_M$ , 则  $EE = K \times E \times \frac{W}{W_M}$

当  $P - EE \leq 0$  时,  $R_s = 0$ ,  $R_u = 0$

当  $P + W \geq W_{bM}$  时,  $R_s = P - EE - (W_b - W)$ ,  $R_u = W_b - W_m$

当  $W_{mM} \leq P + W < W_{bM}$  时,  $R_s = P - EE - (W_b - W) + W_m(1 - \frac{P - EE + A}{W_{MM}})^{(1+B)}$ ,  $R_u = P - EE - R_s$

当  $P + W < W_{mM}$  时,  $R_s = 0$ ,  $R_u = P - EE - (W_m - W) + W_m(1 - \frac{P - EE - R_s + A}{W_{MM}})^{(1+B)}$

模型的旱地产流模块中,以饱和含水量和田间持水量为界限划分地表与地下产流。

(4) 城镇道路产流。

综合考虑城镇道路径流系数,模型可简单地表示为:

$R_c = \varphi P$ , 其中降雨量为  $P$ , 城镇道路产流量为  $R_c$ , 径流系数为  $\varphi$ 。

(5) 分区总产流。

采用不同的产流模型,分别计算上述四种下垫面类型的产流过程,再分别乘以各区的水面、水田、城镇道路和旱地所占的面积,最后求和,求出各分区的产流量。

$$R = [R_w \times S_w + R_f + (R_s + R_u) \times S_{su} + R_c S_c] \times 10^8$$

式中:  $R_w$ 、 $R_f$ 、 $R_s$ 、 $R_u$ 、 $R_c$ 、 $S_w$ 、 $S_f$ 、 $S_{su}$ 、 $S_c$  分别为水面、水田、旱地地表、旱地地下、城镇道路的产流深(mm)和各自对应面积(km<sup>2</sup>)和,为该区分区总产流量(m<sup>3</sup>)。

(6) 汇流计算。

模拟计算中,水面汇流当天产流当天汇流;河道汇流在扣除面上用水的基础上,根据实时河道水面率和区域实时产流,动态计算各河道左右两边可汇入河道水量,对于城镇道路、水田和旱地三种下垫面汇流,采用汇流曲线法汇流,净雨量分三天汇入河网,当天汇流比例为 70%,第二天为 25%,第三天为 5%。

2.3 水动力学模型

天然河道常被认为一维运动,描述在平底、梯形明渠中的河流水流运动的基本方程为圣维南方程组,该方程组由连续方程和动力方程组成,方程表示如下:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\frac{Q^2}{A}) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 |Q| Q}{R^{1.33}} = q_L v_x \end{cases}$$

式中:  $x$ ,  $t$  为距离和时间,  $B$ ,  $Z$ ,  $Q$ ,  $A$  分别为河宽、水位、河道断面流量和过水面积,  $q_L$  为入流量(入流为正,出流为负),  $n$  为河道糙率,  $v_x$  为流速,  $R$  为水力半径,  $v_x$  为入流沿水流方向的速度。对方程组采用四点线性隐式差分格式进行数值离散,采用三系数追赶法对差分方程进行求解。

对于堰闸和泵站等,本文以宽顶堰为例采用堰流公式分淹没出流和自由出流进行模拟;由前面河道和堰闸水流运动模拟分别得到了河道断面水位流量与相应河道首末节点水

位的线性函数关系及联系的流量与上下节点水位的线性关系,依据水量平衡原理建立节点水位方程,对于节点方程的求解,需同时联立河道水流运动方程与堰流公式,经代入整理后得到节点方程组,进而采用逐次超松弛迭代法对节点方程组进行求解。

2.4 水资源调配模型

(1) 需水预测。本文主要将研究区用水户分为农业、工业、生活、生态环境和船闸用水户。农业用水户需水量根据灌溉制度和灌溉面积计算;生活、工业、生态环境和船闸用水户需水量通过调查统计得到或采用定额法计算得出。

(2) 可供水量计算。根据河道可供水量、用水户需水量和取水口门供水能力三者来确定调度,取三者中最小值作为不同用水户供水量。根据国民经济发展的实际需要,农业、工业、生活、生态和船闸五类用水具有不同的保证率,按照供水优先级进行供水。优先供给生活需水,工业需水次之,船闸需水第三,生态需水第四,农业需水最后。

(3) 供需平衡。以地级行政区、水资源分区、干线以及区间等不同统计口径为计算单元,根据水源、水利工程可供水量和研究区需水量进行水源、口门、河道供需平衡。

2.5 水资源调度

根据江苏省南水北调沿线水工程的实际运行情况,在制定水资源调度方案时,主要从不同时间段、控制节点或控制区域、控制条件等几方面考虑。时间段包括汛期、非汛期、排涝期、非排涝期、灌溉期等;控制节点主要有闸站节点、湖泊节点等;控制条件主要为水量、流量、降雨等。同时,调度时充分利用当地径流,优先利用本地径流,本地水源不足时再考虑调水,在满足当地供水区用水、北调水量及湖泊蓄水后,不足时,再抽调江水补充。

3 模拟结果与分析

研究基于现状与规划两种不同工情进行水资源配置模拟,其中现状年为 2009 年,规划年为 2020 年,现状工情即原江水北调工程;规划工情以现状工情为基础,增加南水北调一期工程,计划扩大抽江能力至 500 m<sup>3</sup>/s,抽江水量 89 亿 m<sup>3</sup>,其中江苏增供 19 亿 m<sup>3</sup>。依据江苏实际灌溉保证率水平,分别研究保证率  $P = 95\%$ (特殊干旱年)、 $P = 75\%$ (一般干旱年)和  $P = 50\%$ (平水年)时研究区需水、供水、缺水情况。

根据模拟计算结果(表 1),规划年需水总量与现状年相比,  $P = 95\%$  的需水增加了 0.8%,  $P = 75\%$  的需水增加了 4.5%,  $P = 50\%$  的需水增加了 5%;相同工情下,不同保证率的船闸、工业、生活、生态需水变化不大,而农业需水量随着干旱程度增加而上升,特殊干旱年农业需水比一般干旱年和平水年多 30 多亿 m<sup>3</sup>;相同保证率下,不同工情的船闸需水基本不变,农业和生态需水变化幅度不大,工业和生活需水变化幅度较大,规划年比现状年分别增加约 41% 和 65%。规划年供水总量与现状年相比,  $P = 95\%$  的供水增加了 13.0%,  $P = 75\%$  的供水增加了 13.8%,  $P = 50\%$  的供水增加了 10.8%,供水量明显增多。基于不同工情或保证率下的分析发现,供水与需水变化趋势一致(表 2)。

从表 3 可以看出,在相同工情下,保证率越高缺水量越

大,尤其是现状工情下的特殊干旱年缺水量达 27.6 亿 m<sup>3</sup>,其中农业用水户缺水尤为突出,缺水量占总缺水的 88.4%。在不同工情相同保证率下,规划后缺水量大大减少, $P=95\%$  的缺水降低了 69.2%, $P=75\%$  的缺水降低了 75.8%, $P=50\%$  的缺水降低了 70.4%。其中,船闸用水户缺水基本不变,工业用水户在平水年缺水不变,在特殊干旱年和一半干旱年缺水均减少大约 75%,三种年型下农业缺水减少在 26.6%~78% 之间,生活缺水减少在 50%~80%,生态缺水减少最明显,在特殊干旱年减少缺水高达 94%。

表 1 不同工情下研究区需水量对比

Tab. 1 Water demand in the study area under different working conditions

用水户名称	亿 m <sup>3</sup>					
	$P=95\%$		$P=75\%$		$P=50\%$	
	现状	规划	现状	规划	现状	规划
船闸	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
工业	23.5	33.2	23.6	33.3	23.5	33.2
农业	138.1	121.4	107.4	95.7	102.6	91.5
生活	11.3	18.7	11.3	18.7	11.3	18.7
生态	5.1	6.2	5.2	6.6	5.1	6.6
合计	185.9	187.3	155.2	162.2	150.3	157.8

表 2 不同工情下研究区供水量对比

Tab. 2 Water supply in the study area under different working conditions

用水户名称	亿 m <sup>3</sup>					
	$P=95\%$		$P=75\%$		$P=50\%$	
	现状	规划	现状	规划	现状	规划
船闸	7.8	7.8	7.9	7.8	7.8	7.8
工业	22.7	33.0	22.7	33.0	23.3	33.0
农业	113.7	113.6	93.7	92.7	93.2	89.0
生活	10.7	18.4	10.8	18.6	11.1	18.6
生态	3.4	6.1	4.0	6.2	4.1	6.2
合计	158.3	178.8	139.1	158.3	139.5	154.6

表 3 不同工情下研究区缺水量对比

Tab. 3 Water deficit in the study area under different working conditions

用水户名称	亿 m <sup>3</sup>					
	$P=95\%$		$P=75\%$		$P=50\%$	
	现状	规划	现状	规划	现状	规划
船闸	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
工业	0.8	0.2	0.9	0.3	0.2	0.2
农业	24.4	7.8	13.7	3	9.4	2.5
生活	0.6	0.3	0.5	0.1	0.2	0.1
生态	1.7	0.1	1.2	0.4	1.0	0.4
合计	27.6	8.5	16.4	3.9	10.7	3.3

以月为时间单位,分析研究区需水、供水、缺水分布特征。不同保证率下规划工情与现状工情相比供需缺水变化量见图 2-图 4。依结果可知,与现状工情相比,规划工情下各时段供水量均有所增加;需水量 6 月-8 月减少,其余月份增加;缺水量在各时段均减少,其中 6 月-8 月显著减少。1 月-5 月需水、供水、缺水变化量基本一致,6 月-12 月变化幅度较大,尤其雨季变化剧烈。保证率  $P=95\%$  下,需水量

12 月增加最多,最大变化值为 4 亿 m<sup>3</sup>,6 月-9 月总减少需水 6.6 亿 m<sup>3</sup>;12 月和 8 月供水变化量较大,分别占全年 21% 和 16%,其余各月供水变化量介于 0.8 亿 m<sup>3</sup>~2 亿 m<sup>3</sup>;缺水量 6 月-9 月减少最多,共减少 14.5 亿 m<sup>3</sup>,占全年 75%。保证率  $P=75\%$  下,与现状年相比,规划年 6 月-8 月需水量减少,6 月减少最多,最大变化值 2.6 亿 m<sup>3</sup>,旱季需水量增加值稳定,介于 1.1 亿 m<sup>3</sup>~1.4 亿 m<sup>3</sup> 之间;各月供水增加量变化较小,维持在 1.5 亿 m<sup>3</sup> 左右;各月缺水量均减少,其中 6 月-9 月减少最多,共减少 10.2 亿 m<sup>3</sup>,占全年 83%。保证率  $P=50\%$  下,各月需水变化与一般干旱年类似,6 月需水减少最多,最大变化值 2.1 亿 m<sup>3</sup>;6 月供水量增加最小,最小值 0.3 亿 m<sup>3</sup>;各月缺水量均减少,旱季减少不明显,6 月-9 月减少最多,共减少 6.9 亿 m<sup>3</sup>,占全年 91%。

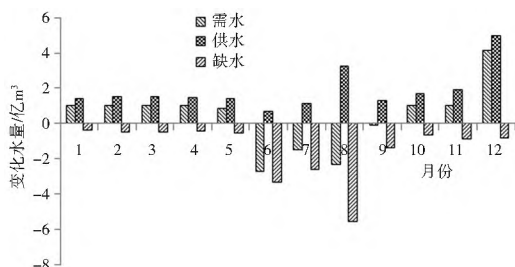


图 2  $P=95\%$  规划与现状供需缺水对比变化量

Fig. 2 Comparison of water supply, water demand, and water deficit between the current and planning conditions under the 95% assurance rate

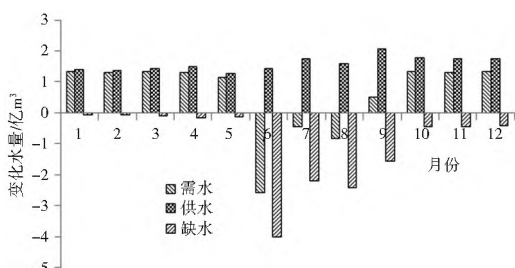


图 3  $P=75\%$  规划与现状供需缺水对比变化量

Fig. 3 Comparison of water supply, water demand, and water deficit between the current and planning conditions under the 75% assurance rate

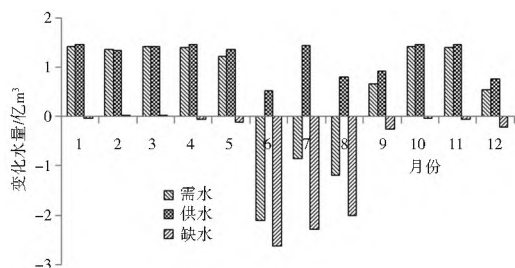


图 4 保证率  $P=50\%$  规划与现状工情相比供需缺水变化量

Fig. 4 Comparison of water supply, water demand, and water deficit between the current and planning conditions under the 50% assurance rate

依模型模拟计算结果可知,与现状相比,2020 规划年江苏省受水区供水能力明显提高,缺水总量大幅度降低, $P=95\%$  年型缺水量 8.5 亿 m<sup>3</sup>,缺水率 4.5%,缺水率降低 10.3%; $P=75\%$  年型缺水量 3.9 亿 m<sup>3</sup>,缺水率 2.4%,缺水

率降低 8.0%;  $P = 50\%$  年型缺水量 3.3 亿  $m^3$ , 缺水率 2.0%, 缺水率降低 5.2%。通过进行合理的水资源配置, 南水北调一期工程实施后水资源保障能力明显增强。

## 4 结语

本研究以江苏省南水北调受水区为例, 以实现水资源宏观配置与用水户微观需求相结合, 基于流域降雨径流模型、水动力学模型以及水资源调配等子模型, 进行水资源配置研究, 提出了现状与规划工情下的兼顾局部与整体、时段与整体需求的水资源配置方案, 并对两种工情下不同水平年下的供水、需水、缺水进行了分析与比较, 成果能达到规划效果与目的。研究成果为了解研究区水资源情势和进行南水北调东线工程水资源配置提供科学依据, 对跨流域调水工程的水资源配置与调度具有一定参考意义。基于目前研究成果与基础, 今后还可从以下方面进行模型的完善与研究: (1) 基于遥感技术与测站数据耦合, 开展水资源优化配置研究, 提高水资源模拟与优化配置的有效性。(2) 研究江水北调与南水北调工程联合调度运行方案标准, 为南水北调运行管理提供科学依据。(3) 从机理出发, 进一步解决与改善水文模拟与水资源配置过程中的技术难题, 比如地表地下水源分割问题、一维河网水利计算过程中易出现河道干枯的问题等。

## 参考文献(References):

- [1] 王浩. 我国水资源合理配置的现状和未来[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 7-14. (WANG Hao. The present and future of water resources allocation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(2): 7-14. (in Chinese))
- [2] 王顺久, 侯玉, 张欣莉, 等. 中国水资源优化配置研究的进展与展望[J]. 水利发展研究, 2002, 2(9): 9-11. (WANG Shunjiu, HOU Yu, ZHANG Xinli, et al. Research advances and prospect on optimal water resources allocation[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(9): 9-11. (in Chinese))
- [3] GUPTA R A. River basin management: a case study of Narmada Valley development with special reference to the Sardar Project in Gujarat, India[J]. Water Resources Development, 2001, 17(1): 55-78. (in Chinese)
- [4] 雷声隆, 覃强荣, 郭元裕. 自优化模拟及其在南水北调东线工程中的应用[J]. 水利学报, 1989(5): 1-13. (LEI Shenglong, QIN Qiangrong, GUO Yuanyu. Self optimization simulation and its application in the Project of South to North Water Transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(5): 1-13. (in Chinese))
- [5] 沈佩君, 邵东国, 郭元裕, 等. 南水北调东线工程优化规划混合模拟模型研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1991, 24(4): 395-402. (SHEN Peijun, SHAO Dongguo, GUO Yuanyu, et al. Mixed simulation model study for the east first period engineering optimization program of South Water to North[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1991, 24(4): 395-402. (in Chinese))
- [6] 王银堂, 胡四一, 周全林, 等. 南水北调中线工程水量优化调度研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 72-80. (WANG Yintang, HU Siyi, ZHOU Quanlin, et al. Optimal water operation for the water Transfer Project from South to North(Middle Route)[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(1): 72-80. (in Chinese))
- [7] 张建业, 陈洁云. 南水北调东线工程优化调度研究[J]. 水科学进展, 1995, 6(3): 198-204. (ZHANG Jianyun, CHEN Jieyun. Study on optimum operation of the east route of South to North Water Transfer Project[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(3): 198-204. (in Chinese))
- [8] Peter w f l, William w g, Yeh m, et al. Multi objective water resources management planning[J]. Water Resources Planning and Management, 1984, 110(1): 39-56.
- [9] Camara a s, Ferreira f c, Loucks d p, et al. Multidimensional simulation applied to water resources management[J]. Water Resources Research, 1990, 26(9): 1877-1886.
- [10] XU Z X, ITO K, SCHULTZ G A, et al. Integrated hydrologic modeling and GIS in water resources management[J]. J Computing in Civil Engineering, 2001, 15(3): 217-223.
- [11] Thomas C B, Gustavo E D, O li G B. Planning water allocation in river basin, AQUARIUS: A System's Approach[A]. Proceedings of 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Subcommittee on Hydrology of the Advisory Committee on Water Information[C]. 2002. 6: 28-81.
- [12] 游进军, 甘泓, 王浩. 水资源配置模型研究现状与展望[J]. 水资源与工程学报, 2005, 16(3): 1-5. (YOU Jirjun, GAN Hong, WANG Hao. Advance in water allocation model and prospect[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2005, 16(3): 1-5. (in Chinese))
- [13] 左其亭, 陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (ZUO Qiting, CHEN Xi. A Approach to water resources plan and management for sustainable development [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [14] 王浩, 秦庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京: 科学出版社, 2003(2): 38-57. (WANG Hao, QIN Ruyong, WANG Jianhua, et al. The rational allocation of water resources in the Huang-Huai-Hai River Basin [M]. Beijing: China Science Press, 2003(2): 38-57. (in Chinese))
- [15] 赵勇, 解建仓, 马斌. 基于系统仿真理论的南水北调东线水量调度[J]. 水利学报, 2002(11): 38-43. (ZHAO Yong, XIE Jiancang, MA Bin. Water dispatch of east-route of South to North Water Transfer Project based on system simulation method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(11): 38-43. (in Chinese))
- [16] 刘建林, 马斌, 解建仓, 等. 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[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 75-79. (LIU Jianlin, MA Bin, XIE Jiancang, et al. Simulation model of multi reservoir and multi consumer and multi work for water unite regulation of cross drainage basin—For example of the east route of South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(1): 75-79. (in Chinese))
- [17] 曾春芬. 地表覆盖遥感分类数据质量及变化对水文过程模拟和水资源评估影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2012. (ZENG Chunfen. The effect of land cover data on hydrological simulation and water resources evaluation[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012. (in Chinese))