

文章编号: 0559-9350(2005)01-0022-06

## 南水北调中线工程向黄河相机补水量分析

阮本清<sup>1</sup>, 韩宇平<sup>2</sup>, 高季章<sup>1</sup>, 王 浩<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 本文依据南水北调中线工程规划设计方案, 在分析水源区和受水区径流丰枯遭遇并遵循丹江口水库调度原则的条件下, 计算了充分利用水库汛期的弃水和中线工程输水渠道的过水能力, 向黄河相机补水的可能水量; 根据分析结果提出了实施方案和相应的政策建议。结果表明, 向黄河相机的补水量, 多年平均为 2.13 亿  $m^3$  (2010 水平年) 和 2.79 亿  $m^3$  (2030 水平年), 最多年份可达 24.10 亿  $m^3$  (2010 水平年) 和 31.01 亿  $m^3$  (2030 水平年)。能够向黄河补水的时间多为黄河偏丰、丰水期和汛期, 补水时机不太有利。

关键词: 南水北调; 中线工程; 黄河; 补水量

中图分类号: TV213

文献标识码: A

南水北调中线工程近期是从长江支流汉江上的丹江口水库向华北引水, 远期再从长江干流引水以扩大引水量, 中线工程供水范围主要为黄淮海平原中、西部地区以及长江流域的唐白河平原, 分属北京、天津、河北、河南及湖北五省市, 重点是城市生活及工业用水, 兼顾沿线农业及其它用水, 原供水目标没有考虑向黄河补水的问题。由于南水北调中线工程水源区和受水区分属不同的气候区, 存在着不同的丰枯遭遇。当某一时段水源区和受水区来水都相对较为充沛时, 调水工程在满足沿线工业和城市供水既定任务的同时, 南水北调中线工程的输水还可能会有富余容量, 为充分发挥南水北调中线工程的输水效益, 缓解黄河下游用水紧张矛盾, 研究南水北调中线工程向黄河相机补水方案非常必要, 对于未来我国实施“四纵三横”的水资源总体配置格局具有重大战略意义。本文依据南水北调中线工程规划设计方案, 在分析水源区和受水区径流丰枯遭遇的基础上, 根据丹江口水库的调度原则, 在满足当地防洪、汉江中下游的用水需求, 分析充分利用水库的汛期弃水和中线工程输水渠道的过水能力, 以及向黄河相机补水的可行性, 计算了工程的近期和远期可补水量, 提出了推荐方案和政策建议。

## 1 调度方案的拟定

《南水北调中线工程规划》(以下简称《规划》)之《汉江丹江口水库可调水量研究》中提出了不加坝调水方案 20 个, 加坝调水方案 17 个, 同时综合提出了 7 个代表方案<sup>[1]</sup>。本次将《规划》中的推荐方案 5(近期工程调水方案)、方案 6 和方案 7(远期工程调水方案)作为基本方案, 同时根据补水的实际情况拟定 2 个扩展方案。

1.1 方案 1 该方案为南水北调中线 2010 规划水平年推荐方案 5。丹江口水库后期规模, 即水库正常蓄水位为 170m, 陶岔总干渠渠首设计引水流量为  $350m^3/s$ , 加大引水流量为  $420m^3/s$ , 渠道规模为分期实施; 汉江中下游部分闸站改扩建、局部航道整治及兴建兴隆枢纽、建设引江济汉工程, 可调水量为 103.41 亿  $m^3$ , 其中陶岔渠首为 97.13 亿  $m^3$ , 汉江中下游不需梯级渠化<sup>[1]</sup>。其水库调度见图 1。

收稿日期: 2004-07-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(50239090)

作者简介: 阮本清(1959-), 男, 河南辉县人, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为水资源系统工程。

1.2 方案2 本方案是在方案1的基础上扩展的一个新方案,即将方案1中陶岔总干渠的渠道规模由原来的分期实施变成一次建成,即总干渠渠首设计引水流量由  $350\text{m}^3/\text{s}$ 、加大引水流量  $420\text{m}^3/\text{s}$  直接增加到设计引水流量  $500\text{m}^3/\text{s}$ 、加大引水流量  $630\text{m}^3/\text{s}$ 。该方案的其他指标同方案1。

1.3 方案3 本方案也是在方案1的基础上,将陶岔渠的渠道规模由原来的分期实施变成一次建成的扩展方案,即总干渠渠首设计引水流量由  $350\text{m}^3/\text{s}$ 、加大引水流量  $420\text{m}^3/\text{s}$  直接增加到设计引水流量  $630\text{m}^3/\text{s}$ 、加大引水流量  $800\text{m}^3/\text{s}$ 。该方案的其他指标同方案1。

1.4 方案4 该方案为南水北调中线2030规划水平年代表方案6。丹江口水库后期规模,总干渠渠首设计引水流量  $500\text{m}^3/\text{s}$ 、加大引水流量  $630\text{m}^3/\text{s}$ 、汉江中下游部分闸站改扩建、局部航道整治及兴建兴隆枢纽、建设引江济汉工程,可调水量  $121.09\text{亿}\text{m}^3$ ,其中陶岔渠首  $109.98\text{亿}\text{m}^3$ 。由于大坝加高,库区移民需要安置<sup>[1]</sup>。其水库调度见图2。

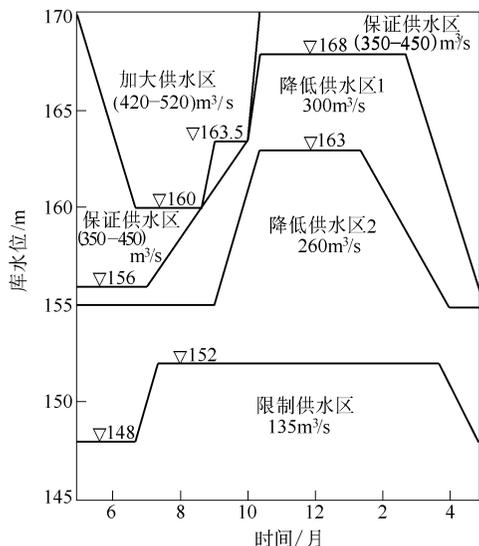


图1 方案1、2、3丹江口水库调度

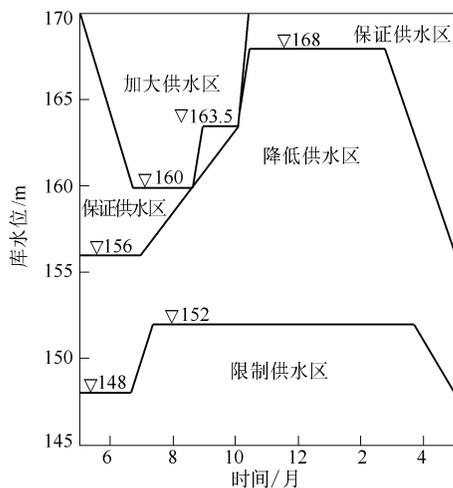


图2 方案4、5丹江口水库调度

1.5 方案5 该方案为南水北调中线2030规划水平年推荐方案7。丹江口水库后期规模,总干渠渠首设计引水流量  $630\text{m}^3/\text{s}$ 、加大引水流量  $800\text{m}^3/\text{s}$ 、汉江中下游部分闸站改扩建、局部航道整治及兴建兴隆枢纽、建设引江济汉工程,可调水量  $131.93\sim 163.90\text{亿}\text{m}^3$ ,其中陶岔渠首  $120.85\sim 153.60\text{亿}\text{m}^3$ 。总干渠规模最大,库区移民需要安置<sup>[1]</sup>。其水库调度图见图2。

## 2 向黄河相机补水调节计算

2.1 调节计算条件 南水北调中线向黄河相机补水的调节计算条件包括丹江口水库初始库容、丹江口水库入库系列、汉江中下游需水下泄过程、受水区需陶岔调出的水量过程、清泉沟需水过程、输水总干渠规模和丹江口水库的调度线等。

丹江口水库入库水量按2010年和2030年两个水平年计算,入库径流按实测还原为天然径流后再扣除各规划水平年的上游耗水,系列为1956年5月~1998年4月;根据汉江中下游采取的不同工程措施和规划水平年,分别提出丹江口水库下泄的流量过程,其过程包括工农业、生活需水、航运及环境用水,汉江中下游需水系列也为1956年5月~1998年4月;考虑受水区的需水过程,陶岔渠首调出水量系列采用《南水北调中线工程规划》专题报告之二《供水调度与调蓄研究》成果<sup>[2]</sup>;清泉沟为引丹灌区农业需水,按各规划水平年规模求其需水量;对于各方案输水总干渠规模,则见本文第1节;丹江口水库的调度运用规则尊重中线工程规划《汉江丹江口水库可调水量研究》<sup>[1]</sup>所设计的调度运用原则,对于方案1~方案3采用如图1的调度图,方案4和5则采用图2的调度图。

2.2 调节计算方法 根据上述各计算条件和既定的供水原则,依据水量平衡原理,采用以下方法进行

调算:

$$S_{\text{库容}}(k) = S_{\text{库容}}(k-1) + Q_{\text{入库}}(k) - Q_{\text{下泄}}(k) - Q_{\text{陶岔}}(k) - Q_{\text{清泉沟}}(k) - Q_{\text{弃水}}(k) \quad (1)$$

$$Q_{\text{补水}}(k) = Q_{\text{剩}}(k) - Q_{\text{弃水}}(k) \quad (2)$$

式中:  $S_{\text{库容}}(k)$ 、 $S_{\text{库容}}(k-1)$ 、表示第  $k$ 、 $k-1$  时段末丹江口水库库容量(亿  $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{入库}}(k)$  表示第  $k$  时段丹江口水库入库水量(亿  $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{下泄}}(k)$  表示第  $k$  时段为满足丹江口水库发电和下游需水量(亿  $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{陶岔}}(k)$  表示第  $k$  时段受水区需陶岔调出的水量(亿  $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{清泉沟}}(k)$  表示第  $k$  时段清泉沟需调水量(亿  $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{弃水}}(k)$  表示第  $k$  时段水库产生的弃水(亿  $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{补水}}(k)$  表示第  $k$  时段向黄河的补水量;  $Q_{\text{剩}}(k)$  表示第  $k$  时段渠道剩余过水能力。

由式(1)可计算出各时段丹江口水库产生的弃水量,再根据式(2)调节计算出各时段向黄河的补水量。南水北调中线工程能否实施向黄河相机补水及其补水量的多少,不仅取决于调蓄计算过程中丹江口产生弃水的多少,另一重要条件是取决于黄河以南渠道的过水能力。即在有弃水产生的时段,判断陶岔渠首的过水流量是否小于渠首加大引水能力,当流量小于渠首加大引水能力,如果时段弃水大于渠道剩余过水能力,则按渠道剩余过水能力向黄河实施补水;如果时段弃水小于渠道剩余过水能力,则时段所有弃水都可向黄河实施补水。如果本时段陶岔渠首的过水流量等于渠首加大引水能力时,本时段向黄河补水为0。向黄河相机补水的调节计算流程见图3。

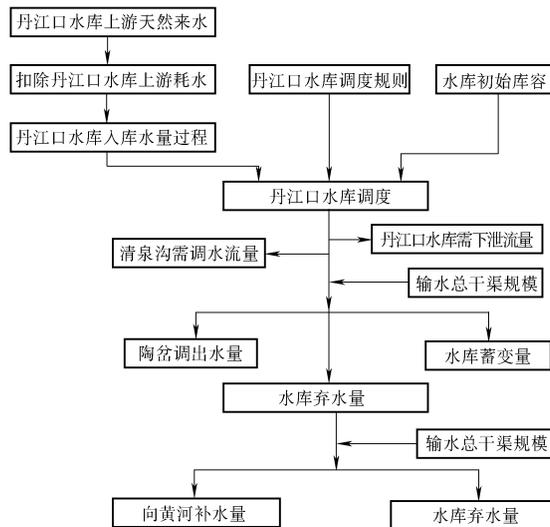


图3 南水北调中线工程向黄河相机补水计算流程

2.3 向黄河相机补水调节计算结果 根据上述计算方法,进行长系列(1956年5月~1998年4月)调算,其结果见表1。

### 3 相机补水结果分析

从各方案的计算结果来看,在1960、1962、1966、1973、1977、1978、1988、1992~1997年共13年,无论是近期规划方案还是远期规划方案都没有水补给黄河;对于2010水平年的规划方案1来说,除了上述年份没有补水外,在1959、1961、1969、1972、1976、1979、1981、1986、1987、1990和1991年共24年也没有补水;对于2030水平年的规划方案4和方案5来说,除了上述年份没有补水外,由于届时无无论是汉江上游的耗水、汉江中下游的补偿下泄流量需求、还是清泉沟的引水都有不同程度的增加,而丹江口的天然来水量却没有增加,所以使得大部分年份也没有水补给黄河,只是在丹江口来水特别丰的年份才有水可补,方案4的多年平均补水量为0.7亿  $\text{m}^3$ ,方案5的多年平均补水量为2.79亿  $\text{m}^3$ 。对比黄河的丰枯情况来看,没有补水的年份大多也是黄河的平水年份和偏枯年份。

除了没水补给黄河的年份外,方案1~方案5其它年份都对黄河有一定的补水量,从表1可知,在42个水文年中,方案1有18年可向黄河实施补水,方案2和方案3有29年可向黄河补水,方案4有9年

可向黄河补水, 方案 5 有 15 年可向黄河补水; 向黄河补水最多的年份方案 1~ 方案 5 可向黄河补水分别为 24.10 亿  $m^3$ 、50.62 亿  $m^3$ 、70.03 亿  $m^3$ 、14.57 亿  $m^3$  和 31.01 亿  $m^3$ ; 有水可补年份多年平均补水量方案 1~ 方案 5 分别为 4.98 亿  $m^3$ 、12.56 亿  $m^3$ 、19.70 亿  $m^3$ 、17.17 亿  $m^3$  和 21.97 亿  $m^3$ 。这说明向黄河相机补水量的多少不仅取决于丹江口水库的弃水量, 也取决于输水渠道规模。

表 1 各方案向黄河相机补水调算统计结果(水文年)(单位: 亿  $m^3$ )

年份	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	年份	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
1956	2.30	11.53	18.62	0.00	3.01	1978	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1957	0.22	3.91	6.89	0.00	0.00	1979	0.00	1.65	1.65	0.00	0.00
1958	2.98	10.36	16.34	1.07	7.04	1980	1.94	11.16	18.63	0.00	0.00
1959	0.00	7.38	13.35	0.86	1.80	1981	0.00	12.91	23.37	0.00	2.58
1960	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1982	1.27	10.49	17.96	0.10	6.27
1961	0.00	1.84	3.34	0.00	0.00	1983	12.06	37.22	56.63	6.42	18.37
1962	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1984	5.83	24.61	38.56	4.03	14.70
1963	7.41	19.82	28.78	1.22	7.19	1985	1.97	12.01	19.48	0.00	4.08
1964	24.10	50.62	70.03	14.57	31.01	1986	0.00	1.84	3.28	0.00	0.00
1965	1.93	16.69	28.54	0.00	9.26	1987	0.00	3.69	6.63	0.00	0.00
1966	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1988	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1967	0.38	4.06	7.05	0.00	1.81	1989	1.14	15.94	26.01	0.00	0.00
1968	3.41	13.84	21.31	0.32	3.63	1990	0.00	13.90	23.83	0.00	0.00
1969	0.00	7.38	13.35	0.00	0.00	1991	0.00	1.02	1.02	0.00	0.00
1970	0.75	0.75	0.75	0.00	0.00	1992	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1971	1.84	5.64	8.63	0.00	0.00	1993	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1972	0.00	9.88	16.36	0.0	0.00	1994	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1973	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1995	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1974	7.90	16.05	22.02	0.00	0.00	1996	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1975	12.22	30.67	45.60	0.77	4.52	1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1976	0.00	7.38	13.35	0.00	2.05	平均	2.13	8.67	13.60	0.70	2.79
1977	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						

当中线工程对黄河有水可补时, 黄河的丰枯情况也是决定补水能否实现的因素之一。各方案具体可以补水的年份对应黄河(采用黄河花园口天然径流资料分析)的丰枯遭遇见图 4~ 图 8。从图中可以看出, 各方案给黄河补水量较大的年份多集中在黄河的丰水年或偏丰年, 这对实现补水并不利。

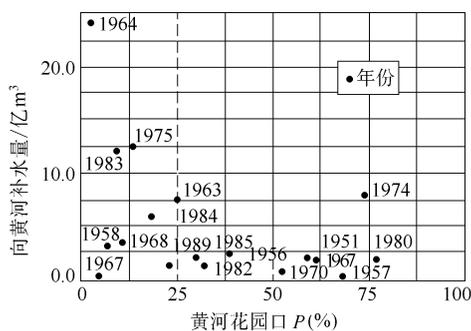


图 4 方案 1 条件下向黄河补水系列对应黄河的丰枯遭遇

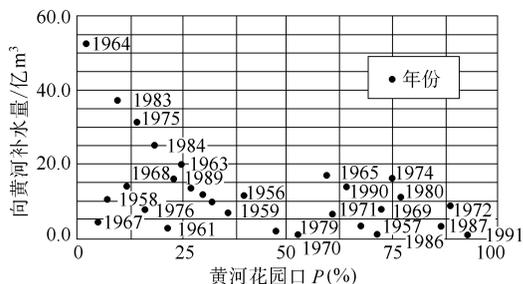


图 5 方案 2 条件下向黄河补水系列对应黄河的丰枯遭遇

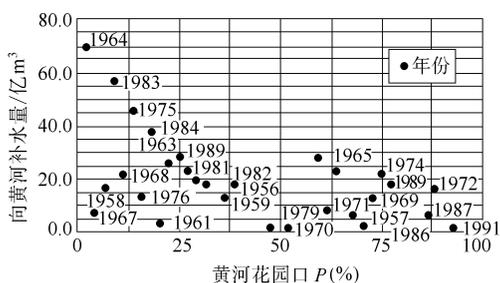


图 6 方案 3 条件下向黄河补水系列对应黄河的丰枯遭遇

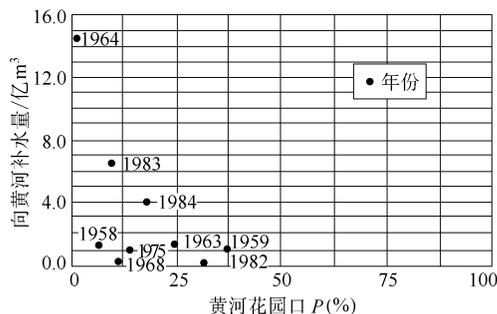


图 7 方案 4 条件下向黄河补水系列对应黄河的丰枯遭遇

以方案 1 为例来考察中线工程向黄河补水量的年内分布情况。从图 9 可以看出, 中线工程在一年内对黄河的补水主要发生在汛期, 其中表现为 7 月份和 9 月份的双峰情况, 方案 1 条件下 7 月份多年平均可向黄河补水 1.0 亿  $m^3$ , 9 月份可向黄河补水 0.96 亿  $m^3$ , 这与丹江口水库天然来水情况较为一致。补水发生在汛期对黄河来说并不利, 要让补水发挥一定的效益就必须采取措施对补水和其它水利工程进行联合运用。

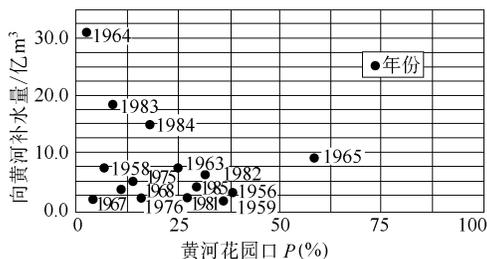


图 8 方案 5 条件下向黄河补水系列对应黄河的丰枯遭遇

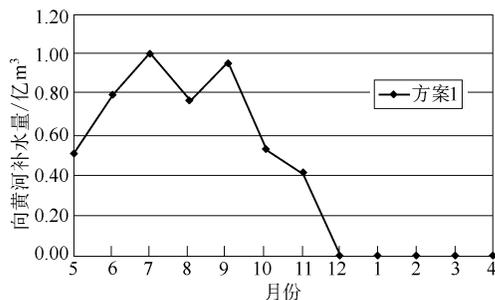


图 9 方案 1 条件下有水可补年份向黄河月平均补水量

## 4 推荐方案

从分析可看出, 影响向黄河补水量的主要因素除了丹江口的弃水量大小外, 黄河以南总干渠的渠道规模也是重要的制约因素之一, 考虑到本项目的研究目标是在不改变丹江口水库及引水渠道工程规模、首先保证中线受水区用水需求的条件下, 按照丰枯互补、高效利用的原则向黄河相机补水, 所以综合分析各方案相机向黄河的补水情况后认为: (1) 近期向黄河相机补水工程推荐选用方案 1 作为代表, 该方案也是《南水北调中线工程规划》所推荐的近期方案 5。该方案在满足北方受水区近期 (2010 年水平) 的需水要求后, 多年平均可向黄河补水 2.13 亿  $m^3$ , 最多的年份可向黄河补水 24.10 亿  $m^3$  (1964 年), 42 年中有 18 年可向黄河实施补水, 有水可补年份平均补水量为 4.98 亿  $m^3$ , 可以配合黄河相关工程进行调水调沙。(2) 近期工程推荐选用方案 5 作为代表, 该方案也是《南水北调中线工程规划》所推荐的远期方案 7。该方案由于陶岔渠首的引水能力扩大到了 800  $m^3/s$ , 虽然丹江口水库所担负的各项任务都有一定程度的加大, 该方案虽然难以满足北方受水区远期 (2030 年水平) 的需水要求, 但在有些时段仍产生了弃水, 有些时段的弃水正好有足够的渠道容量将其输往黄河, 所以有些年份可以向黄河实施补水, 其多年平均可向黄河补水 2.79 亿  $m^3$ , 最多的年份可向黄河补水 31.01 亿  $m^3$ , 42 年中有 15 年可向黄河实施补水, 有水可补年份平均补水量为 3.07 亿  $m^3$ 。

## 5 政策建议

为有效实施中线向黄河相机补水, 需积极采用相关的政策和措施, 包括: (1) 中线近期工程建成后, 对南水北调中线工程运行过程中有可能提供的实际补水量进行实时跟踪, 及时相机向黄河实施有效补水。由于水价和需水预测偏差等原因, 受水区在中线工程实施后并不一定能按照规划的需水量用水, 中线工程在运行过程中有可能产生更多的向黄河补水的机会, 能够有更多的水补给黄河。加之实际发生的受水区和水源区丰枯情况不可能同上述选取分析的系列年相同, 为此更需要有关机构在中线工程建成运行后实时跟踪和监测工程的运行情况, 尽可能多地相机对黄河进行补水。(2) 继续研究向黄河补水的运用方式、强度和时机等, 使补水能发挥更大的经济和生态环境效益。对于有限的补水而言, 只有通过和黄河相关工程的联合运用才能发挥到最大的效益。根据黄河的丰枯实际情况研究补水的合理运用方式是补水效益得到充分发挥的重要因素。(3) 合理评估补水的效益, 进而研究征收相应的合理的补偿金, 弥补补水的水费。

由于补水与黄河水的联合运用, 使得补水不仅产生了生态效益, 而且产生了经济效益, 那么对补水

所产生经济效益的评估则显得很有必要,正确评价这部分经济效益便可以向受益部门征收相应的补偿金用来补偿中线补水的水费支出。对于生态用水的效益评估目前尚存在难度,建议这部分费用暂由代表国家的流域机构来承担。(4)建议中线工程向黄河相机补水的组织和管理由黄河水利委员会明确指定。由专门的机构负责,有利于强化水量的调度管理,有利于各部门的信息沟通,是实现补水量发挥效益的保证。最后需要指出的是,若中线向黄河相机补水实施,补水的工程措施及政策补偿措施等需要进一步研究。

致谢:本文的完成得到了陈志恺院士和滕炜芬教授级高级工程师的指导,参加本文工作的还有中国水利水电科学研究院蒋任飞博士,黄河勘测规划设计有限公司的王煜、杨丽丰和杨立彬同志,在此一并致谢!

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 水利部长江水利委员会,长江勘测规划设计研究院.南水北调中线工程规划(2001年修订)专题报告之一:汉江丹江口水库可调水量研究[R].武汉:水利部长江水利委员会,2001.
- [ 2 ] 水利部长江水利委员会,长江勘测规划设计研究院.南水北调中线工程规划(2001年修订)专题报告之二:供水调度与调蓄研究[R].武汉:水利部长江水利委员会,2001.

## Analysis on opportune surplus water supply to Yellow River by South to North Water Transfer Middle Route Project

RUAN Ben-qing, HAN Yi-ping, GAO Ji-zhang, WANG Hao  
(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** According to the principle of water balance the amount of opportune surplus water supply to the Yellow River by South to North Water Transfer Middle Route Project is calculated. The variations of hydrological condition both in water providing area and water receiving area due to difference in local weather are taken into account, and the surplus water must be the abandoned water of Danjiangkou Reservoir which can be transferred by the channel of Water Transfer Project not exceeding its transfer capacity. The analysis result shows that the annually averaged water amount to be transferred is  $0.213 \times 10^9 \text{ m}^3$  (for 2010 scenario) or  $0.279 \times 10^9 \text{ m}^3$  (for 2030 scenario), the maximum is  $2.41 \times 10^9 \text{ m}^3$  (for 2010 scenario) or  $3.11 \times 10^9 \text{ m}^3$  (for 2030 scenario). The periods for water supply are in the flood season of the Yellow River.

**Key words:** South to North Water Transfer Project; Middle Route; Yellow River; opportune surplus water  
(责任编辑:王成丽)