

Hydrologic Calculation and Economic Benefit Analysis of Water Transfer from Xushui River to Heihe River*

Qian Zhang, Bing Shen[#], Shuhong Mo

Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an
Email: [#]shenbing@xaut.edu.cn

Received: Aug. 14th, 2012; revised: Aug. 29th, 2012; accepted: Sep. 7th, 2012

Abstract: Xi'an is a water shortage city. The Shaanxi Water Resources Bureau put forward a plan on water transfer from the Yangtze River basin to guarantee economic development of the Guanzhong region. Water transfer from the Xushui River to the Heihe River is one of them. It is an inter-basin project and has been basically completed. But the water resources evaluation is added after 2010. Several deficiencies should be corrected according to the related standards. In addition, whether the operation scheme is feasible should take into account for the south-to-north water transfer project in order to exhibit the economic benefits. The calculations show that the water been obtained is 46,610,000 m³ and is not much different from design value which is 42,480,000 m³. This project should be reserved to reduce or suspend water calls in the key period after water transfer from Han River to Wei River, but transferable water should be under control.

Keywords: Inter-Basin Project; Water Transfer; Hydrologic Calculation; Water Resources; Operation Scheme

引渭济黑工程水文计算复核与经济效益分析*

张倩, 沈冰[#], 莫淑红

西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安
Email: [#]shenbing@xaut.edu.cn

收稿日期: 2012年8月14日; 修回日期: 2012年8月29日; 录用日期: 2012年9月7日

摘要: 西安是一个资源性缺水城市。陕西省水利厅提出了从长江流域调水来保证关中地区经济发展的方案, 引渭济黑调水工程即是其中之一。引渭济黑工程是一个跨流域调水工程, 现已基本建成, 但其水资源论证为 2010 年后补作。该论证报告有若干不足之处, 应按照相关规范重新计算其调水量; 且需分析研究陕西省南水北调工程建成后, 该工程的运行方案, 以更好地发挥其经济效益。经计算, 该工程的可引水量为 4661 万 m³, 与实际工程设计年引水量 4248 万 m³ 结果相差不大。从经济环境效益及需水量等各方面考虑, 引渭济黑工程在引汉济渭建成后应继续保留, 但需控制其调水量, 在取水区下游用水关键时期减少或暂停调水。

关键词: 跨流域调水; 引渭济黑工程; 水文计算复核; 可调水量; 运行方案

1. 引言

水资源的时空分布不均以及随着社会发展和经

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50939004)。

[#]通讯作者。

作者简介: 张倩(1990-), 女, 内蒙古人, 在读硕士, 从事干旱半干旱水文水资源研究。

济增长而不断增加的需水量, 使得水资源缺乏成为当今世界各国面临的一项重大问题。调水工程是人类开发、利用水资源的重要手段, 是将水从某一流域向其它流域或区域输送, 从而实现水资源合理调配和开发利用的工程措施。随着用水问题的凸显, 各国政府对

水利建设越来越重视, 调水工程的发展也日益迅速。西安市引渭济黑调水工程是西安市从2006年11月开始实施的陕西省第二个南水北调建设项目, 是将位于秦岭南麓西安市周至县境内渭水河的地表水, 通过隧洞穿越秦岭调至秦岭北麓黑河水系, 从而作为西安市的应急水源和渭河在特枯情况下的生态补水。现该工程已基本建成, 但其水资源论证报告为2010年后补作。该论证报告有若干不足之处, 应按照有关规范补充论证, 并重新确定工程的调水量; 且需分析研究陕西省南水北调工程建成后, 该工程应如何运行, 以发挥其经济效益。

本文首先运用地区水文手册, 查得渭水河流域吊沟口处的年平均径流深 R , 用公式 $P = 1000 RF$ (F 为控制流域面积)计算流域引水断面多年平均径流量。根据水文手册, 在多年平均年径流深变差系数 C_v 等值线图 and C_s/C_v 分区图上, 按比例内插法求得所选流域形心处的 $C_v = 0.51$ 和 $C_s/C_v = 2.5$, 据此计算出引水断面不同频率的年径流量, 以多年平均径流量的一定百分比作为河道内生态环境用水量, 进而计算引渭济黑工程年平均可引水量。然后利用工程调水量及金盆水库的径流资料确定引渭济黑工程运行后黑河金盆水库的来水量, 查有关资料可得黑河水库城市生活及灌溉需水量, 根据以上数据计算水库的兴利库容, 将其与水库实际兴利库容进行比较, 复核水库的供水能力^[1]。最后分析调水工程对调水区的生态环境影响, 并分析其经济效益, 根据这些分析结果讨论陕西省南水北调工程建成运行后引渭济黑工程的运行方案。

2. 引渭济黑工程可调水量计算

2.1. 引渭济黑调水工程概况

引渭济黑调水工程位于周至县厚畛子镇秦岭山中, 是陕西省开工建设的第二条南水北调工程。工程通过全长6252 m的输水隧洞穿越秦岭山脉, 将秦岭南麓长江流域汉江水系渭水河水送入黑河上游支沟, 进入黑河流域, 经金盆水库调蓄后供西安市供水, 实现由长江流域到黄河流域的跨流域调水, 以缓解西安市的水资源短缺问题。引渭济黑调水工程总投资1.76亿元, 主要建设由引水枢纽、引水隧洞、洞后电站、管理设施、交通工程五部分组成。引水枢纽位于周至县老县城渭水河吊沟口下游100 m处, 最大坝高11.75

m, 坝长28 m, 引水隧洞全长6252 m, 断面 2.9×3.1 m, 设计最大引水流量 $15 \text{ m}^3/\text{s}$, 洞后电站装机 2×320 kw。上坝道路由都督门至引水枢纽, 全长1908 m, 采用砼路面, 宽3.5 m。

2.2. 引渭济黑工程可调水量计算

可调水量是反映跨流域调水后水资源优化配置的综合指标, 既要调出区的生态环境不会造成无法弥补的影响, 又要满足调入区的利用需求, 是比较复杂的资源优化配置问题。目前国际上的常用标准是: 调水总量不得超过调出河流总水量的20%, 河流本身的开发利用不得超过其总水量40%。本文所说的可调水量, 即指渭水河的河川径流量, 在扣除当地用水和河道内环境用水后可能提供的水量。因为工程引水口附近流域人口稀少, 无水利建设和工业生产, 人类活动对流域径流影响几乎可以不予考虑, 所以此处的可调水量分析不用考虑当地用水。

2.2.1. 引水断面年径流量计算

因引渭济黑工程取水区流域属无资料地区小流域, 无分区经验公式可用来估算多年平均年径流量, 故本文以流域形心处的多年平均年径流深 R 代表该流域的多年平均年径流深, 用公式 $W = 1000 RF$ 来计算多年平均年径流量 W 。据汉中地区实用水文手册, 在多年平均年径流深等值线图上, 按比例内插法求得 $R = 410 \text{ mm}$, 经计算, $W = 0.5161$ 亿 m^3 。在多年平均年径流深变差系数 C_v 等值线图和 C_s/C_v 分区图上, 按比例内插法求得所选流域形心处的 $C_v = 0.51$ 和 $C_s/C_v = 2.5$, 并以此代表相应流域的 C_v 值和 C_s/C_v 值, 查皮尔逊III型频率曲线表得相应模比系数 K_p 值, 按公式 $R_p = K_p R$ 计算设计流域各种频率的设计年径流深, 然后用公式 $W_p = 1000 R_p F$ 转换为某频率的设计年径流量。据此计算出引水断面 $P = 20\%$, 50% , 75% 和 95% 四种频率的年径流量如表1所示。

2.2.2. 河道生态环境用水量计算

河道生态环境用水量即为保持下游河道生态环境健康所必须预留的下泄水量。对于引渭济黑工程, 由前面的计算结果可知, 该工程调水口处多年平均年径流量约为渭水河年平均径流总量的4.5%, 因此即使将断面以上水量全部引走, 对其下游工农业发展需

Table 1. Annual runoff of section water diversion
表 1. 引水断面的年径流量

面积 (km ²)	年径流量(亿 m ³)				
	多年平均	P = 20%	P = 50%	P = 75%	P = 95%
125.88	0.5161	0.7019	0.4645	0.3251	0.2013

水量的影响也不会很大。且引水口下游河流水系发育, 两岸仍有很多支流汇入, 沿河径流量增加很快。因此, 在考虑可调水量, 只需保证引水口以下河流生态系统的生物多样性和改善环境质量, 即工程可调水量主要取决于取水口下游河道最小生态环境的用水量。

因引济济黑工程的调水口处流域无长期观察的水文站, 缺乏长期实测水文资料, 并且没有满足参证条件的参证流域, 所以经过分析论证, 可以多年平均径流量的 10% 作为河道内生态环境用水量。故可计算得河道生态环境用水量为 516.1 万 m³。

2.2.3. 引济济黑工程的可调水量

由上节分析可知, 在计算可调水量时, 只需扣除河道下游生态环境用水量即可, 据此算得的年平均可引水量为 4661 万 m³, 与实际工程设计年引水量 4248 万 m³ 结果相差不大。根据引济济黑工程的建设规模可知, 该工程设计年引水量为 4248 万 m³, 占清水河取水口处多年平均径流量 5161 万 m³ 的 83%, 除去少部分水流下泄到下游河道外, 清水河引水工程取水口处的大部分流量都属于调水范畴^[2]。

3. 黑河金盆水库供水能力复核

3.1. 水库基本资料复核

3.1.1. 水库基本参数

工程供水系统为黑河金盆水库枢纽工程。金盆水利枢纽工程坝址位于黑峪口, 控制面积 1481 km², 坝

址处多年平均径流量 6.24 亿 m³, 是一座以城市供水为主, 兼顾灌溉、结合防洪及发电等功能的综合利用大(二)型水利水电工程, 水库枢纽由大坝、导流泄洪洞、溢流洞、引水洞和坝后电站组成。水库坝体为粘土心墙砾石坝, 坝高 130 m。总库容 2.0 亿 m³, 有效库容 1.77 亿 m³。

3.1.2. 库区径流概况

黑河流域的径流主要由降雨形成, 其径流变化特点与降雨一致, 主要表现为年际变化大, 年内分配不均, 据黑峪口水文站实测资料统计, 最大年径流量 12.2 亿 m³(1981 年), 最小年径流量 1.31 亿 m³(1995 年), 最大值和最小值分别为多年平均值的 1.95 倍和 0.21 倍。年内丰水期 7~10 月径流量约占年径流量的 62%, 枯水期 11~3 月径流量仅占年径流量的 12.4%。

3.1.3. 水库特征参数

- 1) 水库库水位与面积库容关系见表 2。
- 2) 死水位: 死水位 520.0 m。
- 3) 汛期限制水位: $Z_{\text{汛限}} = 591.0 \text{ m}$, $V_{\text{汛限}} = 1.7465 \text{ 亿 m}^3$, 时间为每年 7 月 1 日起到 9 月 30 日。
- 4) 正常高水位: $Z_{\text{正常}} = 594.0 \text{ m}$, $V_{\text{正常}} = 1.874 \text{ 亿 m}^3$, $V_{\text{调节}} = 1.774 \text{ 亿 m}^3$ 。

3.2. 水库需水量复核

3.2.1. 灌溉需水量

根据黑河水库已知资料可知, 年灌溉供水量为 1.23 亿 m³, 其供水量各月分配情况如表 3 所示^[3]。

3.2.2. 城市需水量

黑河金盆水库的城市年供水总量为 3.05 亿 m³, 供水保证率为 95%, 其供水量各月分配情况如表 4 所示。

Table 2. Water level-area-the capacity of reservoir
表 2. 水库水位与面积库容关系

水位(m)	490	500	510	520	530	540	550	560
面积(km ²)	0	32	57	90	118	153	196	240
库容(万 m ³)	0	150	400	1000	2050	3400	5150	7300
水位(m)	570	580	590	600	610	620	630	640
面积(km ²)	285	349	428	498	574	651	730	806
库容(万 m ³)	9990	13,150	17,000	21,650	27,000	33,000	40,100	47,640

Table 3. Monthly distribution of irrigation water supply of reservoir
表 3. 水库灌溉供水量各月分配情况

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水量(亿 m ³)	0.00	0.00	0.08	0.12	0.02	0.29	0.23	0.22	0.13	0.00	0.09	0.04
比例(%)	0	0	6.6	9.8	1.8	23.6	18.7	17.9	10.9	0	7.1	3.6

Table 4. Monthly distribution of urban water supply
表 4. 城市供水各月分配情况

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水量(亿 m ³)	0.22	0.23	0.24	0.24	0.26	0.29	0.30	0.29	0.26	0.24	0.23	0.22
比例(%)	7.4	7.7	7.9	8	8.5	9.5	10	9.5	8.5	7.9	7.7	7.4

3.3. 水库来水量复核

3.3.1. 水库来水量年内分配计算

调水工程的水量特征值已在第三章取水量计算中算出。根据《西安市实用水文手册》查得调水前该流域年平均径流量及不同频率年径流量值,在此基础上综合调水量的相应频率值,即可算出引渭济黑调水工程运行后黑河流域水库的不同频率年径流量。根据水库供水保证率 95%,取频率为 95%的年径流量值 3.1193 亿 m³。根据水文手册计算黑河水库径流年内分配见表 5。

3.3.2. 水库损失水量复核

蒸发损失 水库库面蒸发损失 = 库区多年平均水面蒸发量 - (降雨量 - 径流量),库区多年平均水面蒸发量 E 可由地区水文手册查得其蒸发皿测量值,在乘以相应的折算系数求得,根据水文计算成果,该值为 775 mm;根据水文手册,黑峪口以上流域多年平均降雨深 $P = 811$ mm;黑峪口以上流域多年平均径流深 $R = 421$ mm;则库面蒸发损失 $E_{库} = 775 - (811 - 421) = 385$ mm。根据水文手册查得库面蒸发的各月分配比,即可求得水库的各月蒸发深。

渗漏损失 对于一般水库,如缺乏实测资料时,可采用经验数据按各月蓄水量百分数进行粗略估算。按中等水文地质条件考虑,取经验数据为 1%,即每月渗漏损失为该月水库平均库容的 1%。

3.4. 水库供水复核计算

供水复核计算是在对已建水库查清基本参数,算清来水量、需水量的基础上,通过水量平衡计算,查明水库调节径流能力的计算过程。本论文水库供水复

核计算,主要是对水库兴利库容进行复核计算,即重新确定水库的兴利库容,将其与水库实际兴利库容进行比较复核。

水库调节时,起调水位为黑河金盆水库的汛限水位 591 m。每年汛期即 7 月 1 日至 9 月 30 日期间,水库水位应保持在汛限水位 591.0 m(相应库容为 1.7465 亿 m³)以下,其余时段以正常高水位 594.0 m(相应库容为 1.874 亿 m³)作为调节水位上限,以死水位 520.0 m(相应库容为 0.100 亿 m³)作调节水位下限^[4]。

根据以上计算数据,估算黑河水库兴利库容的计算过程见表 6。由表可知,推算到供水期结束时,水库缺水 0.45 亿 m³,水库蒸发、渗漏损失的水量较多,不应忽视。同时表明,仅依靠黑河金盆水库无法满足西安市供水要求,还需来自石头河及石砭峪水库的补给水量,几处水源共同调节,才能满足西安市的供水要求。

4. 引汉济渭工程建成后引渭济黑工程取舍的讨论

4.1. 引汉济渭工程概况

引汉济渭工程地跨黄河、长江两大流域,穿越秦岭屏障,主要由黄金峡水利枢纽、秦岭输水隧洞和三河口水利枢纽等三大部分组成。工程规划在汉江干流黄金峡和支流子午河分别修建水源工程黄金峡和三河口水利枢纽蓄水工程,经总长 98.3 km 的秦岭隧洞送至关中。工程供水范围为西安、宝鸡、咸阳、渭南等沿渭大中城市,主要解决城市生活、工业生产用水。工程总调水规模 15 亿 m³,其中从汉江支流子午河自流调水 5 亿 m³,从汉江干流黄金峡水库引水 10 亿 m³;

Table 5. Annual runoff distribution of Hei river reservoir
表 5. 黑河水库年径流量年内分配表

年径流量(万 m ³)	频率 (%)	各月分配(万 m ³)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31,193	95	655	615	1354	3219	2829	1837	8840	3712	4994	1610	861	667

Table 6. Calculation of reservoir benefit capacity considering water loss. Unit: million m³
表 6. 计入损失时的兴利库容计算表。单位: 亿 m³

月份	来水量	用水量	损失水量	来水(+)	用水(-)	Σ来 - 用	库容
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
9	0.4994	0.39	0.14786		0.03846	1.7740	1.8740
10	0.1610	0.24	0.10940		0.18840	1.5856	1.6856
11	0.0861	0.32	0.06822		0.30212	1.2835	1.3835
12	0.0667	0.27	0.04954		0.25284	1.0306	1.1306
1	0.0655	0.23	0.04545		0.20095	0.8207	0.9207
2	0.0615	0.23	0.05241		0.22091	0.5998	0.6998
3	0.1354	0.32	0.07464		0.25924	0.3405	0.4405
4	0.3219	0.36	0.09654		0.13464	0.2059	0.3059
5	0.2829	0.28	0.10655		0.10365	0.1023	0.2023
6	0.1837	0.58	0.14219		0.53849	-0.436	-0.336
7	0.8840	0.54	0.13727	0.20663		-0.230	-0.130
8	0.3712	0.51	0.18337		0.32217	-0.552	-0.452
全年	3.1193	4.28	1.21344				

工程设计最大输水流量 70 m³/s, 水库总库容 9.39 亿 m³, 泵站总装机功率 15.65 万 kW, 电站总装机容量 18 万 kW, 建设总工期 99 个月, 静态投资 168 亿元。

4.2. 引渭济黑工程对调水区的环境影响

引渭济黑调水工程的多年平均调水量 4248 万 m³, 占渭水河多年平均水量 10.30 亿 m³ 的 3.8%, 在引水口下游 1.2 km 处又有支流汇入, 因此对下游流量的影响甚小。建设区人烟稀少, 工程简单, 对枢纽上游水质和生态不会造成不良影响。引水区下游的企业很少, 不会产生较大环境污染。工程引水后造成的下游多年平均径流总量的减少, 会导致下游污染浓度相对增加, 但由于进入河流的污染物总量很少, 引水后下游河流水质的变化不明显。在调水后, 经过计算工程建设区的污水排放浓度, 主要监测指标表明该地区的水质在污染物浓度方面完全达标, 保证了当地群众的生活用水质量。并且, 由于调水工程的建设, 取水口以上区域作为西安市的城市水源地, 必将加强对该区域的保护措施, 从而对下游水环境改善将起到积极

作用。综上所述, 引渭济黑调水工程对调水区的水环境影响较小。由于工程的引水量比例小, 故工程对下游供水量的影响甚小, 对下游的灌溉、发电、旅游景区等项目用水量影响也甚小。对于下游防洪, 由于引渭济黑工程是在保证下游生态基流和避开农灌用水关键时期引水, 相当一部分为洪水流量, 因此, 会对减轻流域下游的防洪压力起到有利作用。

工程对下游生态环境的影响主要是对下游植被及自然保护区的影响。渭水河流域上游植被类型多属亚热带向温带过渡的落叶阔叶林带和针阔混交林带, 流域内植被良好, 境内森林覆盖率高达 60%, 植物种类也较丰富。该工程在引水枢纽以上对植被的种类及覆盖率均无明显影响, 枢纽以下至河口段, 对植被数量也无明显影响。距渭水河流域最近的自然保护区为太白山自然保护区, 因为工程引水枢纽距该自然保护区外缘距离较远, 所以不致对太白山自然保护区造成不良危害; 其次是位于渭水河上游太白县黄柏乡和二郎坝境内的太白渭水河流域珍稀水生动物省级自然保护区, 由计算分析可知, 调水工程调水后引起的流

量变化不大, 能够满足珍稀水生动物的生存需要^[5], 即不会对保护区产生明显不良影响。

4.3. 引渭济黑工程的简要经济效益分析

跨流域调水经济效益, 主要表现在农业灌溉、工业和城市用水、发电、航运、防洪和旅游等方面。引渭济黑调水工程总投资 1.76 亿元, 设计年调水能力 4248 万 m³。工程于 2007 年 1 月全面开工建设, 2010 年 10 月主体工程全面竣工。到 2020 年引汉济渭工程完工运行, 引渭济黑调水工程共运行了 10 年。从经济效益方面分析, 引渭济黑工程建成后, 每年可为黑河水库补水 4248 万 m³, 作为城市生活及工业用水, 据分析其工业供水效益为 2250 万元, 发电效益为 22.7 万元。在运行期 10 年内, 该工程预计可收到的总的经济效益为 2.3 亿元, 且工程建筑物结构简单坚固, 在未来的几十年不会出现问题, 并可继续获得供水、发电等方面的经济收入, 若就此废弃该工程, 则在经济上不合理。

4.4. 关于引渭济黑工程取舍的建议

按现行的实际供水能力和可取水量, 2015 年全市缺口 4.32 亿 m³, 其中市区缺口 2.70 亿 m³; 2020 年全市缺口 7.93 亿 m³, 市区缺口 4.45 亿 m³。引汉济渭工程建成后, 计划分配给西安市 6.7 亿 m³/a 的水量(随着引汉济渭取水总规模的调整, 这个指标可能还要大幅压缩), 这样仍将有 1.23 亿 m³ 缺口(引自《西安市水务局关于建设“引渭济黑”调水工程有关情况的说明》), 从而影响西安市的生产、生活^[6]。故在引汉济渭工程建成后, 西安仍将处于缺水状态, 因此不应废弃引渭济黑工程, 而可酌情况减少该工程调水量。

5. 结语

本文参照水文手册, 重新确定了引渭济黑工程的可调水量, 并对工程运行后黑河水库的供水能力进行了复核, 最后分析工程对生态环境的影响以及工程的经济效益, 得出如下结论: 1) 在引汉济渭工程建成后, 引渭济黑工程应继续保留, 但需按实际情况调水。2) 应在取水区下游用水关键时期(如插秧期)减少或停止引水, 以保障下游生产用水及河流水环境的健康。

参考文献 (References)

- [1] 詹道江, 徐向阳, 陈元芳. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010, 1: 110-177.
ZHAN Daojiang, XU Xiangyang and CHEN Yuanfang. Engineering hydrology. Beijing: China Water Power Press, 2010, 1: 110-177. (in Chinese)
- [2] 雒文生, 宋星原. 工程水文及水利计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1991, 3: 176-248.
LUO Wensheng, SONG Xingyuan. Engineering hydrology and water computing. Beijing: China Water Power Press, 1991, 3: 176-248. (in Chinese)
- [3] 陕西省汉中地区水电局. 汉中地区实用水文手册[M]. 陕西省汉中地区水电局, 1988.
WAPA Hanzhong. The Hanzhong area utility hydrological manual. WAPA Hanzhong, 1988. (in Chinese)
- [4] 叶守泽. 水文水利计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 80-105.
YE Shouze. Hydrological and hydraulic calculation. Bei Jing: Water Power Press, 1992: 80-105. (in Chinese)
- [5] 田世民, 王兆印, 杨吉山, 严登华. 南水北调西线工程的生态影响[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011, 3: 7-66.
TIAN Shimin, WANG Zhaoyin, YANG Jishan and YAN Denghua. The ecological impact of the Western Route Project. Beijing: China Water Power Press, 2011, 3: 7-66. (in Chinese)
- [6] 西安市水务局关于建设“引渭济黑”调水工程有关情况的说明[R]. 西安市水务局, 2010.
The description about the Water transfer project from Xushui River to Heihe River of the Xi'an Water Authority. The Xi'an Water Authority, 2010. (in Chinese)