

# 南水北调西线工程线路设计优化方案探讨

梁书民<sup>1</sup>, RICHARD Greene<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院 农业经济与发展研究所, 北京 100081;

2. 首都师范大学 地球空间信息科学与技术国际化示范学院, 北京 100048)

**摘要:** 系统总结评价了南水北调西线工程设计方案。遵循自流调水、高水低走、纵向坡降均一化、梯级水库库容调节、多路联合调水原则,利用地理信息系统空间分析功能和水力学规划求解方法,计算设计了以米林桑白-岷县铁关门线为主线的高海拔、中高海拔和中低海拔3线联合的最优调水方案,最大调水量为 $1\ 777.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。通过同红旗河方案比较,发现桑白-铁关门线调水方案规避了红旗河方案的缺点,具有线路短,纵向坡降大,交通便利的优点,并且避开了自然保护区和地质灾害高风险区。认为以中低海拔线为主的多线联合调水方案应当成为西线调水的首选方案。

**关键词:** 南水北调; 西线工程; 桑白-铁关门线; 纵向坡降均一化; 多线联合调水; 红旗河

中图分类号:TV212

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)05-0133-09

## Discussion on optimal route design for the West Route of South to North Water Transfer Project

LIANG Shumin<sup>1</sup>, RICHARD Greene<sup>2</sup>

(1. Institute of Agricultural Economics and development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. College of Geospatial Information Science and Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** This paper systematically summarizes and evaluates the designing schemes of the west route of South to North Water Transfer Project. Taking Sangbai, Milin-Tieguanmen, Minxian line as main water transfer route, the joint water transfer scheme of three lines at high altitude, middle and high altitude and middle and low altitude is designed as optimal water transfer plan. By applying GIS spatial analysis and programming solver tools to hydraulics calculation, the scheme's technique parameters are calculated and designed in accordance with the principle of self-flowing by gravity, diverting runoff at high altitude source to low altitude destination, homogenizing longitudinal slope of tunnel bottom, building chain reservoir on the upper stream to regulate reservoir capacity, and diverting water jointly through multiple routes. The maximum annual water transfer capacity is 177.74 billion cubic meters. Compared with the Hongqi Canal scheme, we found that the water transfer scheme of Sangbai-Tieguanmen line avoids the shortcomings of the Hongqi Canal scheme, and it has the advantages of short distance, steep longitudinal slope and convenient transportation facility, also avoids the nature reserves and the high-risk regions of geological disaster. The author believe that the multiple routes combined water transfer scheme plan mainly based on the middle low altitude line should be the first choice for the west route of South to North Water Transfer Project.

**Key words:** The South to North Water Transfer Project; the West Route Water Transfer Project; the Sangbai-Tieguanmen Route; the longitudinal gradient homogenization; the multiple routes joint water transfer; the Hongqi Canal

收稿日期:2018-04-27; 修回日期:2018-06-21

基金项目:中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-IAED-2018-07)

作者简介:梁书民(1966-),男,河北大名,博士,研究员,主要从事水资源、经济地理和农业经济学研究。

通讯作者:RICHARD Greene(1961-),男,美国人,博士,教授,主要从事地理信息系统、土地利用变化及人文地理和城市  
规划研究。

## 1 研究背景

1952年毛泽东主席首先提出了南水北调的伟大构想,并于1953年提出西线调水 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的建议。60多年来,以水利行业为主的各界学者研究了许多方案,2017年底由王浩院士提出的红旗河工程是目前国内影响较大的调水方案。按照起始海拔的高低和调水线路的特点可以将南水北调西线工程线路分为4大类:高海拔线、中高海拔线、中低海拔线和低海拔线。此外还有在青藏高原开凿超长隧洞的调水方案,该类方案在工程技术上是不可行的,故不在本文研究范围。

高海拔线3条:以向柴达木和青海湖调水为特征。典型的有(1)中国科学院陈传友等<sup>[1]</sup>方案,从海拔3670m的雅鲁藏布江永达(曲水县涌德村)开始提水,注入黄河上游的鄂陵湖、扎陵湖,远景引水量为 $435 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,可调往柴达木和塔里木盆地;(2)杨力行等<sup>[2]</sup>方案分别从海拔4260m的楚玛尔河与通天河汇流处的曲麻莱水库引水至格尔木河,从海拔3800m的雅鲁藏布江尼木水库引水至那仁郭勒河,然后沿柴达木盆地南缘向西入新疆;(3)胡长顺<sup>[3]</sup>方案,从青海称多县朵朵乡通天河与细曲汇流处筑坝,沿细曲扬水到海拔4500m向鄂陵湖引水,过青海湖东南缘和湟源县,穿过乌鞘岭抵达古浪县,调水到河西走廊和新疆。

中高海拔线4条:多以黄河贾曲为调水目的地,主要由水利部门提出,有的已有工程规划。(1)水利部规划的西线自流调水方案<sup>[4]</sup>,自海拔3770m的金沙江侧仿水库水面至黄河贾曲,共调水 $170 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,该方案是基于1958-1961年黄河水利委员会的玉树-积石山线调水方案进行的规划<sup>[5]</sup>。(2)黄河水利委员会南水北调西线工程后续水源方案<sup>[6]</sup>,延伸规划南水北调西线工程到海拔3932m的西藏索县色昌乡亚冲村怒江东巴水库水面,使西线总调水量达到 $370 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。(3)原电力部方案,由原电力部贵阳勘探设计院提出,设想以自流为主调水,在海拔3500m以上的雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、金沙江、雅碧江、大渡河上筑高坝,从阿坝以西过巴颜喀拉山分水岭入黄河,最大可调水量 $920 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[7]</sup>。(4)郭开方案修正,郭开方案为自水位3588m的西藏桑日县藏嘎村雅鲁藏布江朔马滩水库至黄河贾曲,崔荃等<sup>[8]</sup>对该方案进行了修正,通过实地勘测和技术可行性分析认为最大可调水量为 $1\,150 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

中低海拔线6条:主要特征是以洮河为出水口。(1)黄河水利委员会的旧调水方案金沙江的恶巴-洮河线,起点为金沙江贡觉县恶巴(俄巴)村<sup>[5]</sup>。(2)长江水利委员会林一山<sup>[9]</sup>方案,从西藏洛隆县怒江嘉玉桥水库引水,逆河扬水与修建运河和隧洞相结合,经金沙江岗托水库,岷江黑水水库,抵达白龙江上游,最后开凿隧道进入洮河干流,自流入黄河刘家峡水库,总引水量设计为 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。(3)杨永年<sup>[10]</sup>的米林派镇-洮河调水方案,起点为米林派镇多雄水库,水面海拔2950m,总调水量 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 调入洮河, $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 用于沿途河流下游梯级发电。(4)陈昌杰<sup>[11]</sup>的米林羌纳-洮河调水方案,起始点羌纳水库水面海拔3000m,以隧洞调水为主,经白龙江和洮河上游,终点为黄河龙羊峡水库,总调水量 $1\,200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。(5)王建华<sup>[12]</sup>的米林比定-洮河卓尼调水方案,起点为米林比定水库,水面海拔3140m,设计调水量为 $2\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,远高于本文计算值。(6)本文主张选用米林桑白-洮河岷县铁关门线,起点为米林桑白水库,水面海拔3180m,以桑白-铁关门为主线,沿途修建几处辅线以增加调水量,同时进行高海拔线楚玛尔河-格尔木调水,以中高海拔线规划西线及延伸调水<sup>[13]</sup>。

低海拔线5条:主要特征是起点和终点海拔低,调水线路纵向坡降最缓。(1)黄河水利委员会的旧调水方案石鼓-渭河线,起点为云南玉龙县金沙江石鼓镇,经西汉江上游入渭河;(2)翁水河-定西线,起点为云南香格里拉县金沙江翁水河,经渭河源地区至定西市;(3)怒江沙布-定西线,起点为西藏察隅县察瓦龙乡怒江沙布村,经渭河上游至定西市;(4)怒江-洮河线,起点仍为察隅县沙布村,终点由岷县入洮河<sup>[5]</sup>。(5)红旗河(大拐弯-定西线),起始于海拔2558m的西藏米林县派镇白马葛琼水库水面,经察隅县入怒江,在德钦县过澜沧江入长江,经金沙江石鼓大拐弯,在木里县入雅砻江,在安顺场沿大渡河西侧山坡北上,经宝兴、汶川、九寨沟,在礼县通过隧洞抵达渭河上游,在通渭到达祖厉河上游,最后折向西进入黄河刘家峡水库<sup>[14]</sup>。

从西线调水的目的可以确定对调水线路的要求。(1)西北地区干旱缺水,土地资源丰富,需要较大的调水量方能满足土地资源开发需要,线路设计应尽量实现较大的调水量。(2)扬水调水需要大量电力,运营成本和管护费用大大增加,调水线路应采取自流调水为主的原则,尽量避免扬水,以节省调水

成本。(3)调水线路要有一定的海拔高度,以利于向土地资源丰富的黄土高原、河西走廊、内蒙古和新疆自流调水。(4)调水线路海拔越高调水量越少,且存在调水线路施工困难,维护成本高的问题,以及冰冻期长供水期短的问题,所以线路不宜过高;线路越低调水量越大,但线路越低纵向坡降越小,隧洞工程量越大,向大西北调水越困难,于是存在引水线路的最优海拔高度问题。(5)高水高走,调水距离较短,调水量少,工程量小,单位调水成本居中等,工程较为可行,如楚玛尔河-柴达木调水,规划西线及延伸。(6)低水低走,可调水量大,但是线路长度大,纵向坡降低,流速慢,工程量大,建设费用高;低海拔调水经过人口稠密地区,移民费用也较大,单位调水成本最高。(7)高水低走,纵向坡降高,流速快,工程量小,建设费用低,最大调水量中等偏上,单位调水成本最低。

通过上述标准评价诸调水线路可见,高海拔和中高海拔方案,属于高水高走,若选择最便捷的路线进行近距离调水,经济上是可行的,但是由于调水量有限,且存在海拔高施工难问题,不可成为西线调水的主要线路。低海拔线路属于低水低走,工程量最大,单位调水成本最高,有的线路由于出水口太低,不能向遥远的新疆调水,受水区仅为渭河平原和华北平原,远远不如建设引汉济渭工程、引白龙江嘉陵江入汉江工程和三峡水库-丹江口水库隧洞增加中线调水量便捷。

中低海拔线路属于高水低走,工程费用和移民费用较低海拔线路大大降低,可调水量减少幅度不大,经济效益最佳;以洮河和黄河刘家峡水库为水源区终点和受水区起点,海拔较高,自流调水区可以覆盖黄土高原、内蒙古高原、河西走廊、塔里木盆地和准格尔盆地;向受水区延伸自流调水可以远到中亚的巴尔喀什湖和锡尔河流域,便于通过调水干渠修建欧亚运河,开辟丝绸之路廉价水路交通。中低海拔线路是最优线路,本文对中低海拔线路进行了进一步优化设计,通过加高水源区首坝,调整沿途大坝高程,和增加洮河出水口河段深挖工程,实现了全程纵向坡降相等和隧洞工程量最小化。

## 2 研究方法 with 调水方案

### 2.1 研究方法

本文使用的西线南水北调的选线原则为:(1)自流调水节省扬水费用,降低运营维护成本,还可以利用水力发电弥补调水造成的河流下游的水力损

失。(2)高水低走,减少隧洞工程量。高水低走线路落差大,可以加大输水线路纵向坡降,增加水流速度,减少隧洞横截面,大大减少隧洞工程量。(3)设计建成最大均一纵向坡降,消除输水瓶颈地段。实现纵向坡降最大化和各段纵向坡降等量化,使水流快速顺畅无输水瓶颈,可比非均一化纵向坡降调水方案明显减少隧洞施工量和建设成本。(4)通过上游阶梯水库库容调节实现线路调水量最大化。我国西北严重缺水,调水量应当是多多益善;梯级开发水库可以单独进行成本核算,不增加调水成本;调水线路上游阶梯式水电开发可以增加调节库容,建设多年调节水库群,使水流均匀化,充分利用隧洞空间实现最大量调水<sup>[15]</sup>。(5)上游优先,高水高走,缩短调水距离,减轻下游调水负荷。通过仔细观察河流走向可以发现长江上游距离柴达木盆地和黄河上游河段距离很近,怒江、澜沧江、金沙江距离黄河贾曲大拐弯也不太远,遵循上游调水优先原则可以大大缩短调水距离,减轻桑白-铁关门线的调水负荷和施工量,这正是高海拔线和中高海拔线调水所依托的最大优势因素。具体研究方法如下:

(1)利用高精度 DEM 数据和 GIS 确定线路走向。经过利用 GIS 空间分析功能的多年研究,确定了中低海拔线路水源区的起点和终点,以及调水线路的大致走向和各段隧洞的距离。在确定线路均一化最大纵向坡降后,可以精细化设计水面高程,最后通过微调隧洞出入口位置确定调水最终线路走向。联合使用了 ASTER-GDEM 和 STRM3 DEM 空间数据,前者垂直精度为 7~14 m,水平精度为 30 m,相当于 1:5 万地形图;后者垂直精度为 10 m,水平精度为 20 m,相当于 1:15 万地形图<sup>[16]</sup>。

(2)利用水力公式计算理论技术参数。谢才公式用于计算明渠均匀流输水量的梯形断面水力半径,巴普洛夫公式用于计算无压隧洞均匀流输水量的圆形断面水力半径<sup>[17]</sup>。

(3)利用微软 Excel 软件工具栏计算隧洞和输水渠的技术参数。利用规划求解功能计算隧洞的技术参数、输水能力<sup>[18]</sup>。已知隧洞纵向坡降,根据当前技术可行性确定隧洞直径和糙率,利用规划求解可以计算出单洞每年最大输水量,和最大输水量的水面中心角(充满角)。利用单变量求解计算输水渠的技术参数和输水能力。根据当前自然河流水面宽度确定深挖或渠化河道的渠底宽度  $b$  值和边坡倾斜系数  $m$  值,根据当前技术可行性确定渠化河道糙率,利用单变量求解可以计算出目标输水量所需要的水

深  $h$  值。

## 2.2 最优调水方案

依据上述调水原则和研究方法,设计出最优调水方案如下。根据高精度径流深度分布图,利用GIS空间分析功能可以计算出水源区的可调水量自北向南依次为:白龙江和白水江共计  $25.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;岷江为  $60.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;大渡河为  $149.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;雅砻江为  $200.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;金沙江为  $268.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ (含楚玛尔河);澜沧江为  $201.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;怒江为  $279.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;雅鲁藏布江及支流(包括尼洋河、易贡藏

布、帕隆藏布)为  $565.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;西藏隆子县洛曲、浪卡子县羊卓雍错、定日县朋曲共计  $26.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。西线总计调水  $1777.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

西线南水北调目的地分为高海拔线、中高海拔线和中低海拔线3股,以中低海拔线为主,具体为高海拔线楚玛尔河调水入格尔木河为  $13.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,中高海拔线,即水利部和黄河水利委员会规划西线及延伸调水,入黄河贾曲为  $422.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,中低海拔线米林桑白-岷县铁关门主线及辅线调水入洮河  $1341.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表1)。

表1 桑白-铁关门调水方案的水源地径流量与目的地受水量

水源区与目的地	河流或地区	流域面积/ $\text{km}^2$	径流深度/ $\text{mm}$	径流量与受水量/ $10^8 \text{ m}^3$
水源区1	白龙江、白水江	8199.4	314.6	25.8
水源区2	岷江	9067.9	664.6	60.3
水源区3	大渡河	40478.2	369.3	149.5
水源区4	雅砻江	65540.9	305.2	200.0
水源区5	金沙江	181211.7	148.4	268.9
水源区6	澜沧江	73093.7	275.5	201.4
水源区7	怒江	91637.6	304.7	279.2
水源区8	雅鲁藏布江及支流	200766.7	281.9	565.9
水源区9	隆子县洛曲	10777.2	82.9	8.9
水源区10	浪卡子县羊卓雍错	8455.1	75.3	6.4
水源区11	定日县朋曲	11639.2	95.3	11.1
合计				1777.4
目的地1	高海拔线入格尔木河			13.2
目的地2	中高海拔线入黄河贾曲			422.8
目的地3	中低海拔线入洮河岷县			1341.4

西藏米林桑白-甘肃岷县铁关门调水为主线。通过调整水库水面高程以获得最大均一纵向坡降。调水起点位于西藏米林桑白水库,水面高程3180m,终点位于甘肃岷县铁关门洮河,河床海拔高程约为2320m,深挖20m至输水隧道上部海拔2300m水面,深挖32.8m至输水隧道底部海拔2287.2m,经12km过渡到洮河干流渠化河道。桑白-铁关门主线的隧洞全长1175.2km,落差880m,平均纵向坡降为0.7488‰,也就是设计的最大均一纵向坡降值。适当增加首库坝高,以实现最大纵向坡降。桑白水库原设计水面高程为3174m,现提高为3180m。桑白大坝坝高增加6m。易贡藏布郎玉水库水面高程增加10.4m。怒江果巴、澜沧江如美、金沙江拉哇、雅砻江两河口水库水面高程下降,其中雅砻江两河口水库水面高程下降最多,达33m。大渡河白湾、毛儿盖河晴朗、白龙江卡坝水库水面高程增加,分别替代大渡河双江口、岷江叠溪、白龙江尼傲,

其中毛儿盖河晴朗水库水面高程增加最多,达76.8m(表2)。调水的尾部是洮河出水口,位于岷县铁关门,需深挖洮河河床以实现最大均一纵向坡降0.7488‰。

表2 桑白-铁关门调水方案的主要水库水面高程调整情况

序号	主坝名称	m		
		水面高程	原设计水面高程	水面高程增加
1	白龙江卡坝	2343.2	2335.0	8.2
2	毛儿盖河晴朗	2513.0	2436.2	76.8
3	大渡河白湾	2579.4	2515.0	64.4
4	雅砻江两河口	2692.0	2725.0	-33.0
5	金沙江拉哇	2794.8	2813.6	-18.8
6	澜沧江如美	2859.5	2875.7	-16.2
7	怒江果巴	2907.6	2920.0	-12.4
8	易贡藏布郎玉	3078.4	3068.0	10.4
9	雅鲁藏布江桑白	3180.0	3174.0	6.0

主线沿途经历长大隧洞有巴曲莫多-鲜水河隧洞长120.4 km,为桑白-铁关门方案的最长隧洞,在318国道和日阿乌曲地下穿过,便于每20 km开凿一处施工辅助隧洞;岷江五里堡-白河喇麻岗隧洞长106.3 km,沿松潘古道南北向延伸,与213国道和四川301省道以及成兰铁路近距离平行,利于开凿施工辅助隧洞;易贡藏布郎玉-波得藏布玉仁隧洞长99.0 km,由若干短洞相连,最长洞段仅为39 km;亚龙藏布波密县康达村-怒江八宿县瓦巴乡隧洞长92.0 km,可借助波密县曲宗藏布和康玉曲开凿施工辅助隧洞;澜沧江如美-金沙江拉哇隧洞长86.4 km,可借助芒康县金沙江宗曲和澜沧江比曲的上游支流开凿施工辅助隧洞。主线沿途需建造大坝20座,其中9座为高坝或大型坝,按照惯例设计坝顶高程均在正常水位以上5 m,设计坝高在300 m以上的有3座,最高为易贡藏布郎玉大坝306.4 m,其次为白龙江卡坝大坝303.2 m和岷江毛儿盖河晴朗大坝303.0 m;坝高在270~300 m之间的大坝有3座,分别为怒江果巴293.6 m,大渡河白湾286.4 m,

和澜沧江如美274.5 m;其余3座大坝大渡河独曲温古和金沙江拉哇坝高在250~270 m之间,桑白大坝设计坝高218.0 m,但是坝顶长1502 m,为最长主坝(表3)。另外需建设上游库容调节梯级水库60座,主要分布在岷江、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江上游干流上<sup>[19]</sup>。调水线路关键地段隧洞设计如下。

(1)中低海拔主线,雅鲁藏布江-怒江隧洞群,即念青唐古拉山隧洞群。隧洞长为91979 m,平行隧洞数为4条,输水量为 $592.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。设计单隧洞半径为6.11 m,糙率为0.015,纵向坡降为0.7488‰,单洞最大输水量为 $148.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最大流量时隧洞水面中心角为303.729°。

(2)中低海拔主线,金沙江巴曲莫多-雅砻江隧洞群,即沙鲁里山隧洞群。隧洞长为120389 m,平行隧洞数为6条,输水量为 $906.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。设计单隧洞半径为6.15 m,糙率为0.015,纵向坡降为0.7488‰,单洞最大输水量为 $151.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最大流量时隧洞水面中心角为303.738°。

表3 纵向坡降均为0.7488‰时水库水面高程和隧洞长度

序号	主坝名称	水面海拔	河底海拔	坝高	坝高+5m	下游隧洞长
0	岷县深挖	2300.0	2320.0			
1	白龙江卡坝	2343.2	2045.0	298.2	303.2	57627
2	白水江香扎	2372.1	2349.0	23.1	28.1	38618
3	白河喇麻岗	2395.6	2250.0	145.6	150.6	31384
4	岷江五里堡	2475.1	2464.0	11.1	16.1	106262
5	小黑水河知木林	2508.2	2302.0	206.2	211.2	44190
6	毛儿盖河晴朗	2513.0	2215.0	298.0	303.0	6345
7	黑水河足木	2529.4	2383.0	146.4	151.4	21935
8	大渡河白湾	2579.4	2298.0	281.4	286.4	66791
9	独曲温古	2582.9	2330.0	252.9	257.9	4681
10	革什扎河边耳	2643.3	2573.0	70.3	75.3	80622
11	雅砻江两河口	2692.0	2580.0	112.0	117.0	65073
12	巴曲莫多	2782.2	2728.0	54.2	59.2	120389
13	金沙江拉哇	2794.8	2539.0	255.8	260.8	16893
14	澜沧江如美	2859.5	2590.0	269.5	274.5	86405
15	怒江果巴	2907.6	2619.0	288.6	293.6	64246
16	亚龙藏布康达	2976.5	2944.0	32.5	37.5	91979
17	波得藏布玉仁	3004.2	2985.0	19.2	24.2	37030
18	易贡藏布郎玉	3078.4	2777.0	301.4	306.4	98975
19	尼洋河麦丁	3129.6	3103.0	26.6	31.6	68375
20	雅鲁藏布江桑白	3180.0	2967.0	213.0	218.0	67355
	合计	880.0				1175175

(3)中低海拔主线,米林桑白-岷县铁关门调水方案尾洞,即迭山隧洞,单洞长度为57 627 m,纵向坡降为0.7488‰,迭山隧洞群有8条隧洞,总计年输水量 $1\,341.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。设计单隧洞半径为6.4 m,糙率为0.015,利用Excel规划求解得出,输水隧道最大输水量单洞每年 $167.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最大流量时隧洞水面中心角 $303.792^\circ$ 。

(4)中低海拔主线,洮河岷县铁关门-龙潭村深挖过渡段,总长12 km,纵向坡降为0.6000‰,糙率取为0.015<sup>[20]</sup>;洮河岷县水文站多年平均年径流量 $35.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,即占洮河总径流量 $49.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的72%,总输水能力增加为 $1376.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;利用Excel单变量求解得出,输水渠设计底宽 $b$ 为50 m,边坡 $m$ 为0.57735,水深 $h$ 为12.02 m,接近6.4半径隧洞最大流量充满高度12.04 m(图1)。

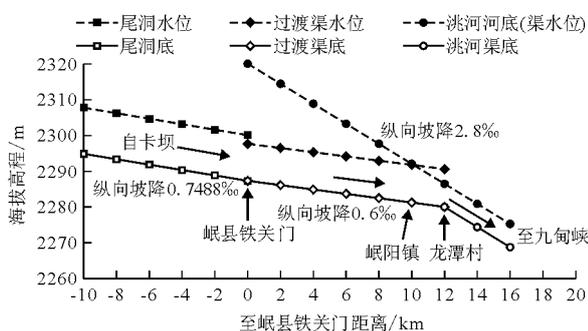


图1 岷县铁关门-龙潭村洮河深挖过渡段

(5)中低海拔主线,洮河岷县龙潭村-九甸峡段洮河干流渠化,长度为93 km,平均纵向坡降为2.8000‰,糙率取为0.015,总输水能力约为 $1382.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中洮河流域增加径流量 $6.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。利用Excel单变量求解得出,干渠底宽 $b$ 为80.0 m,边坡 $m$ 为0.57735,水深 $h$ 为5.43 m。

(6)中低海拔主线,洮河九甸峡-刘家峡段干流渠化,长度为166 km,平均纵向坡降为2.8000‰<sup>[21]</sup>,糙率取为0.015。受水区黄土高原-毛乌素沙地需水量可以利用迈阿密生产模型计算,总面积 $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,垦殖率0.4,灌溉需水量360mm,本地径流量60 mm,实际调水需求300mm,总计实际调水量需求 $405 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,由九甸峡水库引向定西方向;洮河流域再增加径流量 $7.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,总输水能力约为 $985.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。利用Excel单变量求解得出,渠化河道底宽 $b$ 为80.0 m,边坡 $m$ 为0.57735,水深 $h$ 为4.39 m。

(7)中低海拔辅线6条,将中低海拔主线沿途径流量较大的支流径流通过隧洞引入主线。引水水

库正常水位海拔分别为:恒河朋曲4 280 m,内流湖羊卓雍错4 441 m,布拉马普特拉河洛曲3 550 m,雅鲁藏布江帕隆藏布3 350 m,怒江玉曲3 835 m,和白龙江多儿河2 380 m。

(8)中高海拔线,南水北调规划西线及延伸隧洞群,即巴彦喀拉山隧洞群。起点水库为海拔3 932 m的怒江东巴水库水面,隧洞出水口为海拔为3 442 m的黄河贾曲水面,线路隧洞长758 km。终端隧洞长为42 615 m,平行隧洞数为3条,输水量为 $422.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。设计单隧洞半径为6.16 m,糙率为0.015,纵向坡降取东巴-贾曲全段隧洞纵向坡降的平均值为0.6464‰,单洞最大输水量为 $141.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最大流量时隧洞水面中心角为 $303.740^\circ$ 。

(9)高海拔线,楚玛尔河-格尔木河隧洞,即昆仑山隧洞。起点水库为曲麻莱水库水面海拔4 310 m,隧洞出水口为格尔木河水面海拔3 750 m。隧洞长76 902 m,纵向坡降为7.2820‰,设计输水量 $13.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,隧洞半径为1.60 m,糙率为0.015,最大流量时隧洞水面中心角 $302.599^\circ$ 。

## 3 同红旗河方案的比较

### 3.1 红旗河西线调水方案缺点分析

(1)调水线路纵向坡降太低,增加施工量。红旗河主线全线长6 188 km,平均纵向坡降0.210‰,首段大拐弯~怒江段509 km,水位由2 558 m降为2 380 m,平均纵向坡降0.350‰;刘家峡以南渠隧总长2 303 km,水位下降823 m,平均纵向坡降为0.357‰;大渡河-岷江段417 km,落差77 m,纵向坡降仅为0.185‰。根据谢才公式和巴普洛夫公式,纵向坡降越低,输送同样流量所需的水力半径越大,需要开凿的输水隧洞和输水渠横截面越大,较设计的纵向坡降较大的线路增加了施工量。

(2)调水线路靠近边境线,存在敌对国安全威胁问题。红旗河主线隧洞位于西藏自治区墨脱县和察隅县交界处的麦克马洪线以南11 km处,在察隅县中西部线路位于麦克马洪线以北,但是距离该线仅有10~40 km。调水线路经过实际控制区施工将受到影响,建成后也会存在安全问题。本文作者曾于1999年研究过该线路,与红旗河走向高度吻合,但是2010年再次研究西线调水线路时决定放弃该线路,主要原因是距离藏南实际控制线和国境线太近。

(3)调水线路经过强震地带,山体破碎不利于施工。红旗河主线从汶川地震震源以西10 km处经过,需横穿四川省龙门山断裂带,并在龙门山断裂带

以北 30 km 与断裂带平行向东北延伸。线路途经地区经历了 2008 年汶川大地震,山体破碎,容易发生滑坡和泥石流,不利于建设盘山渠和开凿输水隧洞。红旗河共计穿越了 5 条地震带:喜马拉雅,金沙江元江,康定甘孜,武都马边,兰州天水。

(4) 计划在水源区采取以明渠为主的方式输水,对当地植被和环境破坏程度较大。明渠输水在纵向坡降小的情况下需要较大的横断面输水,红旗河在刘家峡以南多沿半山腰森林密布的地区,修建大截面明渠不但工程量浩大,而且破坏护坡植被,容易造成水土流失,对当地的生态环境影响较大。

(5) 雅鲁藏布江大拐弯处及调水线路水源区降水量大,采取明渠方式容易遭受洪灾,加大了护坡工程投入。雅鲁藏布江大拐弯处,南部地段年平均降水量在 2 000 mm 以上,如墨脱降水量为 2 358 mm。调水线路经过泥石流带:雅鲁藏布大峡谷、大渡河、青衣江、岷江上游、涪江白龙江上游。雅江大峡谷多冰川型泥石流,金沙江以北多暴雨型泥石流,沿线山坡陡峭,谷地切割较深,水土流失严重。地质灾害对工程施工和维护带来严重挑战。

(6) 从大拐弯处调水,需要向北绕过易贡藏布江谷地,使调水线路加长,加大了水头损失。由于取水点较低,位于雅鲁藏布江米林县派镇下游 55 km 的白马葛琼附近<sup>[22]</sup>,为向北绕过大拐弯大峡谷、赤隆藏布大峡谷、拉月曲-鲁朗河大峡谷、易贡藏布大峡谷、波都藏布大峡谷,从而使调水线路加长,水头损失加大。根据巴普洛夫公式规划求解计算得出,首段大拐弯-怒江段平均纵向坡降 0.350‰,开凿半径为 6.21 m 的隧洞最大流量流速仅为 2.84 m/s,最大流量充满角 303.75°,年最大输水量  $106.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,若从雅鲁藏布江流域调水  $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,需建造 2 条平行隧洞。

(7) 大拐弯处为无人区,交通条件极差,增加了施工困难。调水线路西藏段经过林芝县排龙乡、拉月乡,波密县易贡乡,墨脱县甘登乡、加热萨乡、帮辛乡、达木乡、格当乡、察隅县上察隅镇,沿 2 558 ~ 2 380 m 等高线延伸,施工区地处无人区,临近人口稀少的偏远乡村,交通条件极差,必然造成工程施工困难,加大工程维护费用。

(8) 调水线路南绕到丽江附近,大大增加了线路长度,降低了调水线路的纵向坡降。调水线路采取低海拔方案,从南部绕过横断山区,使线路向北绕到波密县易贡乡后向南绕到云南丽江石鼓镇的金沙江大拐弯处再向北延伸,增加了调水线路长度,使线

路纵向坡降降低,工程量加大。

(9) 调水线路穿越国家级自然保护区,对当地的生态环境和自然景观造成较大破坏。调水线路在刘家峡水库以南穿越 8 处国家级自然保护区,包括雅鲁藏布大峡谷、察隅慈巴沟、白马雪山、贡嘎山、蜂桶寨、卧龙、王朗、九寨沟。线路采取渠隧集合的方式,对山坡破坏强度大,对自然保护区的生态环境和自然景观造成不利影响。

### 3.2 桑白-铁关门调水方案优点分析

(1) 调水线路纵向坡降大大提高。通过多次调整大坝高度和连接水库的隧洞长度得出了等纵向坡降大坝-隧洞方案,纵向坡降最终调整为 0.7488‰,是红旗河刘家峡以南平均纵向坡降 0.357‰ 的 2.1 倍。按照 0.7488‰ 纵向坡降计算,半径为 6.21 m 的隧洞最大流速可达 4.16 m/s,年最大流量为  $155.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;按照 0.357‰ 的纵向坡降计算,半径为 6.21 m 的隧洞最大流速可达 2.87 m/s,年最大流量为  $107.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年最大流量相比,前者是后者的 1.45 倍。

(2) 调水线路远离边境线,规避了敌对国安全威胁。雅鲁藏布江米林桑白大坝到麦克马洪线直线距离约为 53 km,到国境线的直线距离约为 185 km,地处人口稠密的雅鲁藏布江谷地,为我国西南边疆的战略腹地,军事安全能够得到保障。

(3) 调水线路避开了强震地带,沿途山体完整,利于施工。米林桑白-岷县铁关门隧洞调水方案避开了喜马拉雅,金沙江元江,武都马边,兰州天水 4 条地震带,以最短距离垂直穿越康定甘孜地震带,大大降低了地震可能造成的危害。调水线路远离龙门山断裂带,受地震造成的山体破碎、滑坡和泥石流影响较小,大大降低了地质灾害的风险。

(4) 以隧洞输水为主,大大减少了对地表植被和环境破坏。调水方案通过线路上移和建造长大隧洞,避开了自然保护区;调水方案以隧洞输水为主,大大减少了对地表植被和自然景观的破坏。

(5) 隧洞调水可有效规避洪水对调水线路的冲击,大大减少护坡工程投入。调水线路通过上移避开了暴雨多发的高降水量地带,受洪水和泥石流影响较小,隧洞调水还大大降低了护坡费用和维护费用。

(6) 调水线路的西藏首段平直,避免了绕路。调水线路首段平直向东北方向,避免了北绕易贡藏布江谷地,保持了较大固定纵向坡降,降低了藏水北调的工程量。

(7)川藏铁路和成兰铁路的建设为调水线路施工提供便利交通条件。在建的拉林铁路路过桑白大坝,即将开工的川藏铁路康定至林芝段同本文设计的调水线路两次相交,并有局部地段近距离平行;预计2019年建成的成兰铁路在四川叠溪以北同调水线路近距离平行向北延伸,铁路建设的加速将为未来调水施工带来极大的交通便利。

(8)水源区调水线路呈西南-东北走向,线路平直便捷,大大降低了工程量。调水线路南部沿北

纬30°向东,北部沿东经104°向北,线路平直,避免了绕路,将大大降低工程量和施工难度。桑白-铁关门线隧洞总长度为1 175.2 km,纵向坡降为0.7488‰;红旗河刘家峡以南渠隧总长度为2 303.4 km,平均纵向坡降为0.3573‰。同样输水能力情况下,从线路长度造成施工量比较,红旗河是桑白方案的1.96倍;从低纵向坡降造成施工量差异比较,红旗河是桑白方案的1.45倍,二者叠加造成的施工量差异,红旗河是桑白方案的2.84倍(图2)。

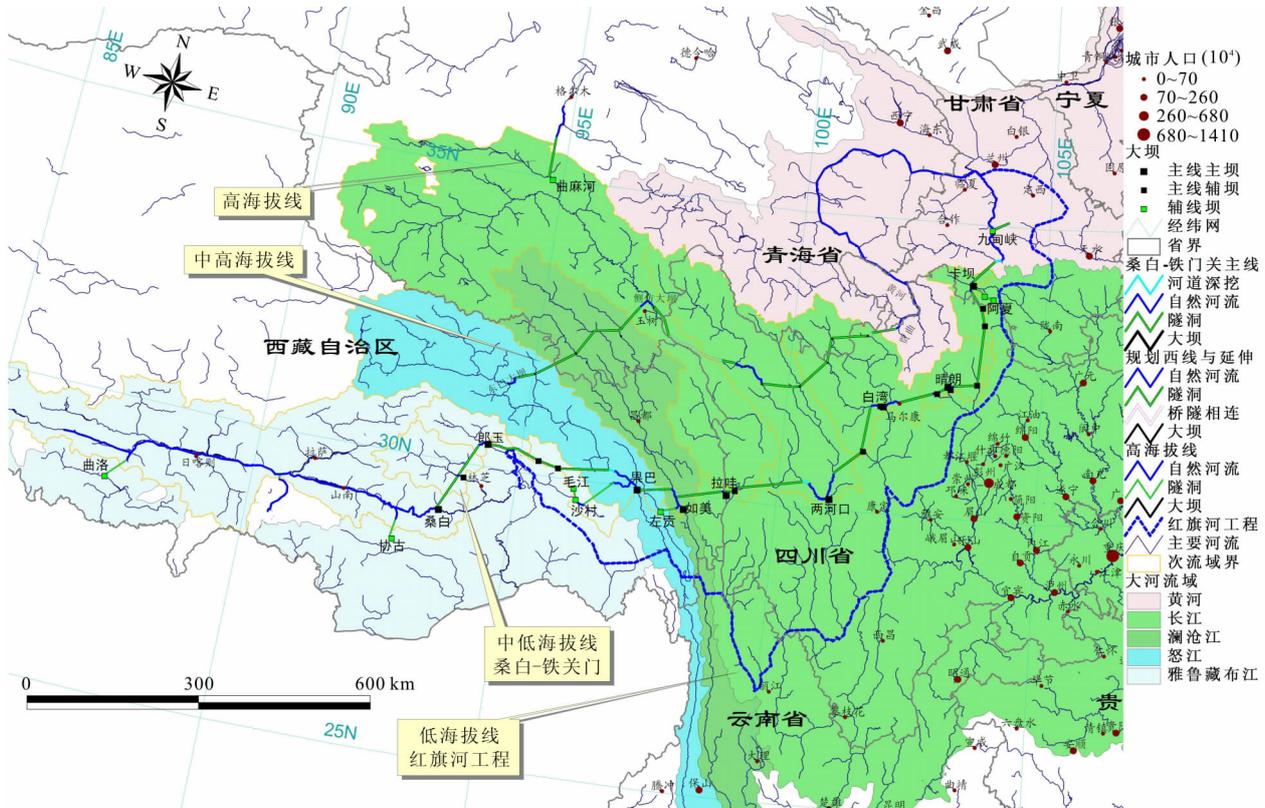


图2 西线南水北调各种线路比较

## 4 结论与讨论

(1)中低海拔桑白-铁关门线具有纵向坡降大、距离短、工程量小的优点,在高海拔、中高海拔、中低海拔、低海拔4类线路中最为经济合理。

(2)桑白-铁关门线避开了自然保护区,采用隧洞输水大大减少了对沿途植被的破坏,经过的地区人口稀少,工程移民少,是环境友好和人文和谐的双优工程。

(3)桑白-铁关门线尽量少地穿越地层断裂带、地震带和地质灾害频发地带,从而使工程建设难度降低,海拔适中受冻土危害较轻,工程建成后的维护费用减少,从工程地质角度评价是优化线路。

(4)桑白-铁关门线调水方案以自流调水为最高原则,采用上游建设梯级水库对径流进行多年调节,可实现调水量最大化和隧洞利用率最大化,以及运营费用最小化。

(5)本文设计的调水方案是高海拔、中高海拔、中低海拔联合调水,受水区涵盖了柴达木盆地和广阔的西北内陆中低海拔地区,为未来建设欧亚运河打下基础,有利于一带一路沿线省区和国家的区域合作和经济发展,具有重要的现实意义。

中国最强盛的汉代、唐代和清代前期均基于对西北地区的经营。新中国建立初期实施的对西北地区以建设兵团为主的农业开发,为当代全面开发西部地区的水资源和土地资源打下了坚实的基础。近

年来我国在建设大型水库、长距离输水隧洞、长距离大型引水渠、大型桥梁、大型引水渡槽等方面的工程技术进步和设备制造发展迅速,超高水坝、长距离隧洞、大跨度桥梁等技术瓶颈被不断突破,2018年3月中铁装备集团完成了直径为15m的硬岩隧洞掘进机(TBM)的研发,为大规模远距离调水工程提供了技术保障。向土地资源丰富的内蒙古和西北地区调水是我国实现民族振兴的关键工程,是各学科专家和各行业人士通过60多年来的探索取得的共识。期盼未来有更多的专家参与西线南水北调线路比选,选出科学合理的优化方案,促进西线调水全面详细规划尽早开展,西线工程早日开工。

### 参考文献:

- [1] 陈传友,马明. 21世纪中国缺水形势分析及其根本对策——藏水北调[J]. 科技导报,1999(2):7-11.
- [2] 杨力行,郑祖国,姜卉芳,等. 南水西调初步设想——兼论水资源的高效利用与合理调配[J]. 八一农学院学报,1995,18(1):36-41.
- [3] 胡长顺. 南水北调西线工程新构想:南水西调及其资金筹措[J]. 甘肃社会科学,2005(4):200-206.
- [4] 水利部黄河水利委员会. 南水北调西线工程规划简介[EB/OL]. (2003-08-25)[2018-04-18]. [http://www.nsb.gov.cn/zx/gcgh/200308/t20030825\\_195174.html](http://www.nsb.gov.cn/zx/gcgh/200308/t20030825_195174.html).
- [5] 水利部黄河水利委员会. 南水北调西线[EB/OL]. 黄河网-史志资料-流域规划-专项规划, <http://www.yellowriver.gov.cn/ziliao/lygh/>.
- [6] 牛景宾,曹廷立,李庆中,等. 南水北调西线工程后续水源初步研究[J]. 人民黄河,2001,23(10):19-20.
- [7] 韩亦方,曾肇京. 对“大西线”调水的几点看法[J]. 水利规划与设计,2000(2):22-25.
- [8] 崔荃,刘刚. 朔天运河技术可能性分析[J]. 人民黄河,1999,21(6):39-42.
- [9] 林一山. 西部南水北调工程概述[J]. 科技导报,1995(6):19-22.
- [10] 杨永年. 南水北调西线工程和西水北调初探[J]. 四川水力发电,2002,21(4):26-31.
- [11] 陈昌杰. 西南调水大西北的初步设想[J]. 人民黄河,2003,25(1):11-12.
- [12] 王建华. 解决我国北方水资源短缺问题的米卓调水河道工程构想[J]. 安阳师范学院学报,2011(2):37-54.
- [13] 梁书民,于智媛. 欧亚草原跨区域调水与内河航道工程技术分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):107-118.
- [14] 红旗河西部调水课题组. 积极筹划红旗河西部调水保障可持续发展[EB/OL]. (2017-12-05)[2018-04-16]. [http://www.xinhuanet.com/politics/2017-12/05/c\\_129757481.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2017-12/05/c_129757481.htm).
- [15] 徐淑琴,刘晓燕. 水利计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [16] 郭笑怡,张洪岩,张正祥,等. ASTER-GDEM与SRTM3数据质量精度对比分析[J]. 遥感技术与应用,2011,26(3):334-339.
- [17] 郭维东,裴国霞,韩会玲. 水力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [18] 史义雄. 在AutoCAD中精确绘制无压圆管均匀流水力特性曲线[J]. 西南给排水,2008(4):39-41.
- [19] 梁书民. 中国城镇化的资源瓶颈与破解方略[M]. 北京:中国农业出版社,2015.
- [20] 王光谦,黄跃飞,魏加华,等. 南水北调中线工程总干渠糙率综合论证[J]. 南水北调与水利科技,2006,4(1):8-14.
- [21] 周侃. 洮河[J]. 甘肃水利水电技术,2015,51(2):62-64.
- [22] 马明,关志华. 雅鲁藏布大峡谷地区水环境评价及保护研究[J]. 地理研究,2000,19(2):194-201.