

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0098

张金良,马新忠,景来红,等.南水北调西线工程方案优化[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):109-114. ZHANG J L, MA X Z, JING L H, et al. Plan optimization of the West Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 109-114. (in Chinese)

南水北调西线工程方案优化

张金良¹, 马新忠², 景来红¹, 杨立彬¹

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 2. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100044)

摘要:通过收集调研大量水文、地质、水资源、工程技术资料,在现有研究基础上论述西线工程方案优化,提出工程研究面临的主要问题;利用多指标对比法,从西线工程调水断面下移自流方案和抽水方案入手,通过调水河流可调水量、环境影响、移民范围、投资费用和经济效益等指标探讨方案的优劣,论证工程下移自流方案的可行性与优越性。同时,为减轻调水对生态、环境、社会等方面的影响,分析并拟定金沙江、雅砻江、大渡河多年平均年调水总量为170亿m³。研究成果可为未来工程建设决策提供重要技术依据。

关键词:南水北调西线;方案优化;调水需求;调水影响;水量配置

中图分类号:TV212.3 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Plan optimization of the West Route of South-to-North Water Diversion Project

ZHANG Jinliang¹, MA Xinzhong², JING Laihong¹, YANG Libin¹

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China;

2. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100037, China)

Abstract: Through collecting and investigating a large amount of hydrology, geology, water resources, and engineering technical data, the paper discusses the optimization of the western route project scheme, and puts forward the main problems faced by the engineering research on the basis of the existing research; using the multi-index comparison method, starting from the water diversion section downward-moving gravity flow scheme and pumping scheme of the west line project, discuss the pros and cons of the plan through indicators such as the adjustable river water volume, environmental impact, resettlement scope, investment cost and economic benefit, and demonstrate the feasibility and superiority of the project shifting the gravity flow plan. Simultaneously, in order to reduce the impact of water transfer on ecology, environment, society and other aspects, the Jinsha River, Yalong River, and Dadu River have been analyzed and drafted for an average annual water transfer volume of $17 \times 10^9 \text{ m}^3$. The research results can provide an important technical basis for future engineering construction decisions.

Key words: West Route of South-to-North Water Diversion; plan optimization; water diversion demand; water diversion impact; water allocation

收稿日期:2020-04-09 修回日期:2020-05-28 网络出版时间:2020-06-01

网络出版地址:https://kns.cnki.net/KCMS/detail/13.1430.TV.20200530.1126.002.html

基金项目:国家自然科学基金(51569025);国家重点研发计划项目(2018YFC1508706)

作者简介:张金良(1963—),男,河南新安人,教授级高级工程师,博士,博士生导师,主要从事水利水电工程设计研究。E-mail:jlzhangyrec@126.com

1 南水北调西线工程概况

1.1 工程背景

南水北调西线工程是我国“四横三纵”水资源配置格局的重要组成部分,可将长江干流,雅砻江、大渡河支流,黄河流域及引黄地区,河西走廊等广大地区串联起来,实现江河互联互通,构建有机联系的大水网,解决我国北方特别是西北地区的缺水问题^[1-5]。

据统计,国际上最具代表性的调水工程有 6 个^[6-12]:(1)美国北水南调工程,将美国北部奥洛维尔湖的水调至南部的佩里斯湖,年调水量在 49.8 亿 m^3 。(2)澳大利亚雪山调水工程,将雪河水通过尤坎本湖及输水渠道引至墨累河流域,年调水量为 30 亿 m^3 。(3)巴基斯坦西水东调工程,从印度河、杰卢姆河、奇纳布河向拉维河、萨特莱杰河、比亚斯河调水,年调水量为 1 660 亿 m^3 。(4)俄罗斯莫斯科运河工程,从伊万科夫水库将莫斯科与伏尔加运河相连,解决了莫斯科近一半的供水。(5)以色列北水南调工程,将以色列东北部太巴列湖湖水调至以色列中南部地区,年调水量为 4 亿 m^3 。(6)埃及西水东调工程,将尼罗河水跨越苏伊士运河运送至西奈半岛,抽水流量为 52.6 m^3/s 。可以看出,实施跨流域调水是解决地区缺水的必要措施。

据研究,即使在充分节水条件下,2035 年黄河流域总需水量将增加到 548 亿 m^3 ,流域多年平均缺水总量仍达 165 亿 m^3 ,其中河道外经济社会缺水 133 亿 m^3 ,缺水主要集中在甘肃、宁夏、内蒙古等西北省(自治区),枯水年份缺口更大,缺水形势十分严峻^[13-14]。与黄河流域比邻的西北地区,水资源仅占全国的 5.7%,属于资源型缺水地区。同时,我国西北地区生态环境脆弱,区域森林面积 11.57 万 km^2 ,覆盖度仅为 3.25%^[15-16];土地荒漠化尤为严重,荒漠化土地面积 218.3 万 km^2 ,占全国荒漠化土地的 81.6%^[17-18]。上游来水减少以及大量引水,导致区域尾间湖泊严重萎缩甚至干涸,如 20 世纪末黑河下游断流、石羊河下游青土湖沙化、月牙湖干涸、艾比湖大面积干涸、祁连山生态破坏等^[19-23]。结合河西走廊生态建设中城市生活用水和工业用水对水资源需求分析^[24-25],预测河西走廊总需水量为 130 亿 m^3 ,其中生态及农业需水量为 88 亿 m^3 ,重点城市生活需水量为 18 亿 m^3 ,工业发展需水量为 24 亿 m^3 。基于规划建设“新龟兹工程”和“新楼兰工程”^[26-27],

结合塔里木盆地和吐哈盆地等生态建设中城市生活用水和工业用水对水资源需求分析,预测总需水量为 160 亿 m^3 ,其中生态及农业需水量为 136 亿 m^3 ,重点城市生活需水量为 14 亿 m^3 ,工业发展需水量为 10 亿 m^3 。因此,依据以往规划,南水北调西线工程受水区范围覆盖黄河流域及沿黄供水区、邻近的河西内陆河、塔里木盆地、吐哈盆地等广大区域,供水对象主要为城乡生活、工业和生态农业。

1.2 工程研究基础及面临的主要科学问题

南水北调西线工程研究工作开始于 1952 年,经过初步研究、超前期规划、规划等阶段,2001 年下半年进入项目建议书阶段,历时已 67 年。2002 年 12 月,国务院以国函[2002]117 号《国务院关于南水北调工程总体规划的批复》批复了《南水北调工程总体规划》。当前仍在进行项目建议书阶段的相关研究工作。相关研究基础见图 1。

南水北调工程原有规划方案分为三期,主要解决青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西等 6 省(自治区)的黄河上中游地区缺水问题。一期工程在大渡河支流阿柯河、麻尔曲、杜柯河和雅砻江支流泥曲、达曲等 5 条支流上分别建引水枢纽,联合调水到黄河支流贾曲,年调水量 40 亿 m^3 。二期工程在雅砻江干流阿达建引水枢纽,引水到黄河支流贾曲,累计年增调水量 90 亿 m^3 。三期工程在通天河上游则坎建引水枢纽,输水到德格县浪多乡汇入雅砻江,顺流而下汇入阿达引水枢纽,布设与雅砻江调水的平行线路调水入黄河贾曲,累计年增调水量 170 亿 m^3 。工程具有调水规模大、受水范围广、调水线路长、工程投资大、调水影响敏感等特点,相关研究面临诸多挑战。

生态影响问题。党的十九大将生态文明建设纳入“五位一体”的总体布局,要求坚持人与自然和谐共生,坚持生态优先,推进绿色发展,贯彻绿色生态、绿色生产、绿色生活理念,实现生态美丽、生产美化、生活美好。西线目前确定的各坝址调水比例在 59.4%~69.2%,平均调水比例达 67%,调水比例偏高,对调水河流生态影响一直受到诸多专家学者的质疑。

调水需求问题。我国西北地区经济社会发展、生态环境改善、城镇化进程加快等均对黄河流域和西北地区水安全提出了更高的要求 and 更严峻的挑战,必须结合新的发展要求科学确定调水需求。



图1 南水北调西线工程研究基础

Fig. 1 Research basis of the West Route of South-to-North Water Diversion

调水方案优选问题。明显的气候变化与不断加剧的人类活动改变了水资源情势,生态优先的发展思路等,均给西线调水工程的方案优化提出了更高的要求和挑战,因此,必须因地制宜地优化研究调水线路,确定科学的工程建设方案。

基于上述问题,将有效降低调水比例、减轻生态环境影响、选取更优调水线路作为本次研究的重点与难点,解析多个调水线路下移方案并探究所提方案的可行性与优化性,提出合理的南水北调西线工程方案,立足于生态—资源—环境—人—经济社会等多角度的综合考量,来实现生态、经济、社会的多方共赢。

2 西线工程调水方案优化

2.1 西线工程调水断面下移自流方案

代表方案为叶巴滩—两河口—双江口—岷江—洮河自流方案。该方案从金沙江水电梯级电站叶巴滩坝下引水,联合雅砻江干流两河口、大渡河干流双江口调水,线路绕经岷江、白龙江入洮河,线路全程自流,涉及四川、青海等3省(自治区)。方案调水断面分别为金沙江叶巴滩、雅砻江两河口、大渡河双江口,较西线一、二期工程下移255~395 km,高程由3500 m左右降低至2500 m左右。

方案由3座在建水源水库、7段输水隧洞及5

座跨沟建筑物组成,输水线路全长825 km,隧洞段823 km。调水断面处多年平均径流量为635亿m³,年调水量170亿m³,断面调水比例27%,其中叶巴滩调水70亿m³、两河口调水60亿m³、双江口调水40亿m³。金沙江叶巴滩、雅砻江两河口、大渡河双江口均为在建或规划枢纽,坝高分别为217、295和314 m;隧洞最大埋深2020 m,平均埋深570 m,工程全线自流引水。引水线路穿越鲜水河断裂、越舟曲—两当断裂、迭部—武都断裂,沿线地震烈度7~8度;方案匡算投资8300亿元,其中双江口调水40亿m³到洮河线路长418 km,投资1420亿元。

2.2 西线工程调水断面下移抽水方案

代表方案为岗托—西线一期调水线路抽水方案。该方案由从金沙江水电梯级电站岗托库区提水到热巴坝下,联合西线一期工程调水入贾曲河口,涉及四川、青海、甘肃等地。该方案由原侧仿坝址下移至岗托坝址,下移了210 km,高程由3542 m降低至2993 m。

方案由7座水源水库、10段输水隧洞及12座跨沟建筑物组成,输水线路全长445 km,隧洞段437 km,最长洞段67 km,泵站地形扬程544 m,年抽水量68亿m³。方案调水断面处多年平均径流量为285亿m³,年调水量113亿m³,断面调水比例40%,其中岗托年调水量68亿m³,西线一期工程年

调水量 45 亿 m^3 。新建水库为岗托、热巴、阿安、仁达、珠安达、霍那和克柯,坝高分别为 223、172、94、93、92、75 和 87 m;隧洞最大埋深 2 020 m,平均埋深 570 m,方案匡算投资 4 610 亿元。

2.3 工程下移方案优化

研究结果显示:相比于抽水方案,自流方案引水坝址处多年平均径流量较大,水量充沛,方案分期实施及后续水源条件较好,能够有效降低工程调水比例;同时,自流方案引水坝址均为在建或规划水库,水库移民淹没影响较小;且自流方案涉及环境敏感目标少(仅涉及四川生态保护红线 3 种、自然保护区 6 个)水库总体淹没损失小,对陆生动物及自然保护区环境无明显影响,基本能够维持调出区涵养水源能力,保持生物多样性,维护区域森林、草地和湿地的生态功能。由此,自流方案的环境影响相对较小;虽然抽水方案前期投资少,但抽水电价按 0.5 元/($kW \cdot h$),年电费约 66 亿元,后期费用较大。综合分析可知,自流方案是更优的下移方案,因此研究选择自流方案作为南水北调西线工程下移的优化方案。

3 可调水量

3.1 调水河流情势分析

工程调水主要涉及金沙江、雅砻江、大渡河等西南河流,3 条河流年均径流均在 200 亿 m^3 以上,可为工程调水提供较为丰沛的水量。为了保证可调水量的合理性,对调水河流径流情势进行分析。

3.1.1 金沙江

长江江源水系发源于青海境内唐古拉山脉的格拉丹冬雪山北麓,汇成通天河后,到青海玉树县境进入横断山区,开始称为金沙江。流经云南高原西北部、川西南山地,于攀枝花市接纳雅砻江,到四川盆地西南部的宜宾接纳岷江为止。巴塘曲口以下至宜宾称为金沙江,河道全长 2 316 km,流域面积 34 万 km^2 ,年径流量 400 亿 m^3 (巴塘站)。多年平均径流量见表 1。

表 1 金沙江主要水文站径流分析结果

Tab. 1 Runoff analysis results of major hydrographic stations in the Jinsha River

站名	高程/ m	多年平均 径流量/亿 m^3	不同频率年径流量/亿 m^3			
			20%	50%	75%	95%
直门达	3 540	122	149	119	98	73
岗托	3 120	164	196	161	136	105
巴塘	2 480	400	475	393	335	262
石鼓	1 820	449	533	441	376	294

3.1.2 雅砻江

雅砻江是金沙江最大支流,发源于青海巴颜喀拉山系尼彦纳克山与冬拉冈岭之间,经青海流入四川,于攀枝花市三堆子入金沙江。雅砻江全长 1 571 km,四川境内 1 357 km,流域面积 13.6 万 km^2 ,河口多年平均流量为 1 860 m^3/s ,水量丰沛而稳定,年径流量 587 亿 m^3 。多年平均径流量见表 2。

表 2 雅砻江主要水文站径流分析结果

Tab. 2 Runoff analysis results of major hydrographic stations in the Yalong River

站名	高程/ m	多年平均 径流量/亿 m^3	不同频率年径流量/亿 m^3			
			20%	50%	75%	95%
甘孜	3 360	86	98	85	76	64
雅江	2 650	208	239	205	181	149
洼里	1 810	360	424	362	326	258
泸宁	1 440	434	498	429	379	314

3.1.3 大渡河

大渡河发源于青海省境界洛山东南麓,分东西两源,东源是木足河,西源绰斯甲河,以东源为主流。两源于四川省马尔康双河口汇合后始称大渡河。南流经金川、丹巴、泸定至石棉折向东流,经汉源、金口河、峨边在乐山草鞋渡纳青衣江后再东流约 5 km,于乐山城南注入岷江,全长约 1 050 km,流域面积 7.68 万 km^2 。多年平均径流量见表 3。

表 3 大渡河主要水文站径流分析结果

Tab. 3 Runoff analysis results of major hydrographic stations in the Daduhe River

站名	高程/ m	多年平均 径流量/亿 m^3	不同频率年径流量/亿 m^3			
			20%	50%	75%	95%
足木足	2 710	75.6	86	75	67	56
绰斯甲	2 540	56.5	66	56	48	39
大金	2 200	166.0	188	165	147	125
丹巴	1 860	240.0	270	238	215	184
泸定	1 330	279.0	310	276	251	217

3.2 可调水量分析

金沙江、雅砻江、大渡河等 3 条河流各调水断面多年平均河川径流总量为 634 亿 m^3 。其中,金沙江叶巴滩坝址 260 亿 m^3 ,雅砻江两河口坝址 209 亿 m^3 ,大渡河双江口坝址 165 亿 m^3 。

为减轻调水对环境、社会等方面的影响,调水量和调水比例按照不超过 30% 控制,初步拟定工程多年平均年调水总量为 170 亿 m^3 ,见表 4。

表4 各调水河流调水量和调水比例分析

Tab. 4 Analysis of diversion quantity and proportion in each river

引水河流 坝址名称	坝址 高程/m	年径流量/ 亿 m ³	调水量/ 亿 m ³	调水比例/ %
金沙江叶巴滩	2 677	260	70	27
雅鲁江两河口	2 602	209	60	29
大渡河双江口	2 268	165	40	24
合计	—	634	170	27

4 结 论

西北地区生态环境脆弱,经济社会发展滞后,水资源短缺是最重要的制约因素,亟需实施跨区域调水工程,缓解区域缺水形势。为此,国家早在1952年就开展了南水北调西线工程的相关研究,但近期气候变化和人类活动影响、生态优先的发展思路等均对工程论证提出了新的要求。本文提出的调水断面下移自流方案,利用在建的水源工程,可以实现全程自流引水,且可有效降低调水比例,减缓生态环境影响。同时,水库移民淹没影响较小,涉及环境敏感目标少,方案切实可行。

工程受水区范围覆盖黄河流域及沿黄供水区、邻近的河西内陆河、塔里木盆地等广大区域。调水工程建设实施后可提高西部缺水地区的水资源承载能力,为生态修复提供水资源支撑,为实施生态文明建设创造条件;为区域土地、能源、矿产资源开发,缓解东部地区经济社会发展的空间压力,优化我国人口和经济格局创造条件;为中华民族开拓更加广阔的发展空间,逐步实现东西部地区平衡发展创造条件;更为促进民族团结提供有力支撑。工程建设具有深远的生态、经济、社会意义。

未来,可基于所提出的南水北调西线工程下移优化方案,针对方案涉及的工程长隧洞施工技术、水量调度及水资源优化配置、工程引水与水库多目标联合调度技术、工程对调水河流生物多样性影响、工程水质分析及预测研究、多水源调水定价、水权管理模式、调水补偿机制等问题开展研究,为工程的建设运行管理提供理论与技术支撑。

参考文献:

[1] 邓铭江,李湘权,龙爱华,等. 支撑新疆经济社会跨越式发展的水资源供需结构调控分析[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3): 379-390. DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2011. 03. 017.

[2] 王浩,秦大庸,王建华,等. 西北内陆干旱区水资源承载

能力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 151-159.

[3] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1-9.

[4] CHEN Y, LI Z, FAN Y, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of northwest China [J]. Environmental Research, 2015, 139: 11-19.

[5] 胡晓芬,陈兴鹏,逯承鹏,等. 西北生态脆弱地区甘肃的生态安全时空演化格局[J]. 生态科学, 2017, 36(6): 165-172. DOI: 10. 14108/j. cnki. 1008-8873. 2017. 06. 023.

[6] CAI X. Water stress, water transfer and social equity in northern China: Implications for policy reforms [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 87(1): 14-25. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2006. 12. 046.

[7] 郑连第. 世界上的跨流域调水工程[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(s1): 8-9. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2003. z1. 004.

[8] 杨立信. 国外调水工程综述[J]. 水利发展研究, 2003, 3(6): 55-56. DOI: CNKI; SUN; SLFZ. 0. 2003-06-016.

[9] SHAN F, LING X L, ZHI G D, et al. Assessing the impacts of South-to-North Water Transfer Project with decision support systems [J]. Decision Support Systems, 2007, 42(4): 1989-2003.

[10] 罗昊,周雪欣. 跨流域调水工程的生态影响识别及评价指标体系研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 190-194. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1212. 2017. 06. 042.

[11] 曹玉升,畅建霞,黄强,等. 南水北调中线输水调度实时控制策略[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 136-142. DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2017. 01. 015.

[12] 杨柳,汪妮,解建仓,等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015(6): 49-56.

[13] 王煜,彭少明,郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 10-20. DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 05. 002.

[14] 彭少明,郑小康,王煜,等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 681-690. DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2017. 05. 005.

[15] 张靖琳,吉喜斌,陈学亮,等. 河西走廊中段临泽绿洲水资源供需平衡及承载力分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 38-47. DOI: CNKI; SUN; GHDL. 0. 2018-01-006.

[16] 聂晓英,石培基,吕蕊,等. 基于生态位理论的河西走廊县域城市竞合关系研究[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 841-851. DOI: 10. 5846/stxb201612272680.

[17] 黄珍,牛最荣,薛媛,等. 农户采用高效节水灌溉技术

- 影响因素分析:以甘肃省张掖市实证调查为例[J]. 中国水利, 2019, 859(1): 69-71. DOI: CNKI: SUN: SLZG. 0. 2019-01-026.
- [18] YANG S, SUN X, DING J, et al. Effects of biochar addition on the NEE and soil organic carbon content of paddy fields under water-saving irrigation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(8): 8303-8311. DOI: 10. 1007/s11356-019-04326-8.
- [19] 田龙, 张青峰, 张翔, 等. 基于改进生态足迹模型的西北地区生态可持续性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 76-81. DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2015. 260.
- [20] XIN Y E, LIU G, LI Z S, et al. Evaluation of ecological effectiveness of protected areas in northwest China [J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(2): 1-14. DOI: 10. 1007/s11769-017-0854-1.
- [21] JIA C, YANG X, SHA Y, et al. The vulnerability evolution and simulation of social-ecological systems in a semi-arid area: A case study of Yulin City, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(2): 152-174. DOI: 10. 1007/s11442-018-1465-1.
- [22] WU J L, MA L. Lake evolution and climatic and hydrological changes in arid zone of Xinjiang[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(2): 135-144. DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2011. 02135.
- [23] 梁变变, 石培基, 周文霞, 等. 河西走廊城镇化与水资源效益的时空格局演变[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 452-463. DOI: 10. 13866/j. azr. 2017. 02. 30.
- [24] 周苏娥, 张明军, 王圣杰, 等. 甘肃省河西地区自然-社会系统脆弱性评价[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 452-462. DOI: CNKI: SUN: ZRZY. 0. 2018-02-020.
- [25] WANG L, ZHANG J, ZHAO L, et al. Ecological water requirement of plant-soil systems along the Silk Road Economic Belt: A case study of the Guanzhong-Tianshui region, China [J]. Geological Journal, 2017(3): 45-57. DOI: 10. 1002/gj. 3002.
- [26] 邓铭江. 南疆未来发展的思考: 塔里木河流域水问题与水战略研究[J]. 干旱区地理(汉文版), 2016, 39(1): 1-11. DOI: CNKI: SUN: GHDL. 0. 2016-01-001.
- [27] 王建顺, 林李月, 朱宇, 等. 西部民族地区流动人口户籍迁移意愿及影响因素: 以新疆为例[J]. 地理科学进展, 2018, 37(8): 132-141. DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2018. 08. 013.

(上接第 108 页)

- [18] 张妞. 干支流洪水遭遇下的黄河宁夏段溃漫堤洪水风险分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [19] 宋松柏, 蔡焕杰, 金菊良, 等. Copulas 函数及其在水文中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] 侯芸芸. 基于 Copula 函数的多变量洪水频率计算研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [21] 何典灿. 基于多变量联合分布的洪水特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [22] 李子远. 非一致性洪水遭遇风险分析及其对河道防洪影响评价[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [23] 梁小青, 纪昌明, 张验科, 等. 雅砻江流域非一致性洪水分析[J]. 水力发电, 2019, 45(7): 11-17.
- [24] 李天元, 郭生练, 罗启华, 等. 双参数 Copula 函数在洪水联合分布中的应用研究[J]. 水文, 2011, 31(5): 24-28.
- [25] 闫宝伟, 郭生练, 陈璐, 等. 长江和清江洪水遭遇风险分析[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 553-559. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2010. 05. 009.