

任金秋, 饶光辉, 张利升, 等. 基于 CPLEX 的水库群联合供水优化调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(8): 245-259. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.018

REN Jinqiu, RAO Guanghui, ZHANG Lisheng, et al. Optimized joint water supply scheduling of reservoir groups using CPLEX[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(8): 245-259. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.018

基于 CPLEX 的水库群联合供水优化调度研究

任金秋^{1,2,3}, 饶光辉^{1,2}, 张利升^{1,2}, 傅巧萍^{1,2}, 李翰卿^{1,2}

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430072; 2. 水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 长江水利委员会水旱灾害防御创新团队, 湖北 武汉 430072)

摘要:【目的】随着极端干旱天气的频发, 城市水资源短缺是快速城镇化进程中面临的共性挑战。为缓解供需紧平衡条件下的城市缺水问题, 建立一套基于线性规划的城市多水源联合供水优化调度模型及联合调度规则提炼技术体系。【方法】以昆明市主城区为例, 采用 CPLEX 线性规划以及分层序列法构建了水库群联合供水优化调度模型, 考虑水源工程在不同库容条件下供水能力变约束, 利用 1956—2021 年长系列来水, 针对 2021 年、2025 年需水进行了优化调度研究, 基于优化调度过程总结调度规则, 提出了保障昆明城区供水的水库群联合调度方式。【结果】结果表明, 1956—2021 年昆明市主城区常规水源水库群多年平均径流量为 6.21 亿 m³。2021 年实际需水量约 4.80 亿 m³, 2025 年预测需水量约 5.88 亿 m³。在 2021 年和 2025 年需水条件下, 常规水源联合调度的供水保证率分别为 86% 和 57%。在考虑德泽水库联合调度后, 供水保证率分别提升至 92% 和 74%。从各供区缺水成因看, 主城片区中, 因云龙水库供水能力限制引起的缺水占 67.9%, 因水资源不足导致的缺水占 32.1%; 而清水海片区的缺水则 100% 由水资源不足引起。【结论】结果表明: 昆明市主城区供水处于供需紧平衡条件下, 遭遇偏枯或特枯年, 供水将面临较大挑战, 资源性缺水与工程输水能力限制是导致缺水的主要原因; 利用 CPLEX 构建的水库群联合调度模型可有效协调多水源协同供水过程, 通过优化调度基本可以解决 2021 水平年条件下的缺水问题, 也可以明显缓解 2025 年条件下的供水紧张形势; 基于优化调度过程, 研究提出了适应供需特征和工程体系的“主水源稳供、辅助水源调剂、散小水源补充”调度规则, 可为昆明市水源水库群联合供水调度提供参考。通过本次昆明主城区供水调度模拟, 展示了利用 CPLEX 线性规划求解器进行水库群联合优化调度的适应性, 进一步探索了基于优化调度过程的水库群联合调度规则提炼方法, 可为类似缺水地区的多水源供水优化调度提供理论依据与实操框架。

关键词: 多水源调度; 线性规划; 分层序列法; 水资源管理; 城市供水; 昆明市; 应急供水; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)08-0245-15



收稿日期: 2025-09-02; 修回日期: 2025-10-20; 录用日期: 2025-10-27; 网络出版日期: 2025-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2340211); 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主科研项目(CX2024Z04-1)

作者简介: 任金秋(1994—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水工程调度、水利信息化研究。E-mail: jonah_ren@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Optimized joint water supply scheduling of reservoir groups using CPLEX

REN Jinqiu^{1,2,3}, RAO Guanghui^{1,2}, ZHANG Lisheng^{1,2}, FU Qiaoping^{1,2}, LI Hanqing^{1,2}

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430072, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan 430072, Hubei, China; 3. Innovation Team for Flood and Drought Disaster Prevention of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: [Objective] With the frequent occurrence of extreme drought weather, urban water shortage has become a common challenge during rapid urbanization. To alleviate urban water shortage under tight supply-demand balance conditions, a technical framework for the construction of an optimized joint water supply scheduling model for multi-source urban water supply and the extraction of joint scheduling rules based on linear programming is established. [Methods] Taking the main urban area of Kunming as an example, a joint optimized scheduling model for water supply of reservoir groups was developed using CPLEX linear programming and the lexicographic method. The variable constraints of water supply capacity of water source projects under different storage conditions were considered. Using the long-term inflow series from 1956 to 2021, optimized scheduling studies were conducted for water demand in 2021 and 2025. Scheduling rules were summarized based on the optimized scheduling process, and a joint scheduling method for the reservoir groups to ensure water supply for the urban area of Kunming was proposed. [Results] The result indicate that the average annual runoff of the conventional water-source reservoir group in the main urban area of Kunming from 1956 to 2021 is 0.621 billion m³. The actual water demand in 2021 is approximately 0.480 billion m³, and the forecasted water demand in 2025 is about 0.588 billion m³. Under the water-demand conditions of 2021 and 2025, the water-supply guarantee rates of joint dispatching of conventional water sources are 86% and 57%, respectively. When the Dez e Reservoir is included in the joint operation, the water-supply guarantee rates increase to 92% and 74%, respectively. Regarding the causes of water shortage in each supply zone, in the main urban area, 67.9% of water shortages are attributed to the supply capacity limitations of Yunlong Reservoir, while 32.1% are caused by insufficient water resources. In contrast, water shortages in the Qingshuihai area are entirely (100%) due to insufficient water resources. [Conclusion] The result indicate that the water supply in the main urban area of Kunming is under tight supply-demand balance conditions. When encountering dry or extremely dry years, the water supply will face great challenges. Resource-based water shortage and limitations in engineering water transmission capacity are the main causes of water shortage. The joint scheduling model of reservoir groups constructed using CPLEX can effectively coordinate the synergistic water supply process of multiple water sources. Through optimized scheduling, the water shortage problem under the normal year conditions in 2021 can be basically solved, and the water supply pressures under the conditions in 2025 can be significantly alleviated. Based on the optimized scheduling process, scheduling rules of “stable supply from primary water sources, regulation by auxiliary water sources, and supplementation by scattered small water sources” which adapt to the supply-demand characteristics and engineering system are proposed. These rules can provide a reference for the joint water supply scheduling of the water source reservoir groups in Kunming. Through the water supply scheduling simulation of the main urban area of Kunming, the adaptability of using the CPLEX linear programming solver for the joint optimal scheduling of reservoir groups is demonstrated, and a method for extracting joint scheduling rules for reservoir groups based on the optimized scheduling process is further explored. This can provide a theoretical basis and a practical framework for the optimized scheduling of multi-source water supply in similar water-scarce areas.

Keywords: multi-source water scheduling; linear programming; lexicographic method; water resources management; urban water supply; Kunming City; emergency water supply; influencing factors

0 引 言

城市供水是城市的生命线，是最重要的民生保障工作。随着中国经济的快速发展，城市的规模也急剧扩张，与此同时也带来了日益突出的水资源供需矛盾。为了解决城市供水问题，多区域多水源的联合供水调度成为研究的热点^[1-3]。张庆华等^[4]基于线性规划，研究了多水库年总供水效益最大的优化调度方法，初步明确了线性规划对于水库群供水调度的适用

性。随着调度对象的增加以及优化目标的复杂，新的求解算法如 NSGA-II^[5-6]、NSGA-III^[7-8]、人工蜂群算法^[9]、遗传算法^[10]等得到大量应用。为了进一步提高供水调度的科学性，学者针对水库调度图的优化开展了大量研究，李成振等^[11]针对大连市供水系统建立了有外调水源的库群联合供水并行调节模型，提出了在调度图中增加双调水控制线，并采用基于库容的分水方法来确定供水任务；康艳等^[12]提出了供水水库群蓄供水次序与调度图双层优化方法，对宝鸡峡灌

区的水库群联合供水调度进行了实例研究;赵思琪等^[13]利用 POA 算法构建供水联合调度模型,研究了重庆市巴南区水库群改进调度图的调度效果。当供水系统不满足城市供水需求时,也有学者利用优化调度模型研究扩展水源方案,黄生志等^[14]结合水库及引调水工程等水源的联合调配,构建了关中地区水库群水网的优化调度模型,明确了水网建设可将水资源系统韧性进一步提高;温天福等^[15]利用 MIKE Basin 构建了袁河流域水库群供水调度模型,分析了调整水库限制供水位、调整水库供水任务和新增蓄水工程等调控措施对供水调度的影响。此外,国内外也有其他学者针对不同地区的城市供水问题,从优化算法、分水方式等方面进行了联合供水调度研究^[16-20]。总的来看,多区域多水源的联合供水调度对于城市供水问题的解决颇有成效。然而,当前的研究也存在一些问题:一是供水优化目标聚焦于综合供水成本最低、供水保证率最高等单一效益指标,虽然能达到优化效果,但是调度过程仍存在一定优化空间;二是约束条件没有根据工程实际运用特性进行调整,如引水隧洞输水能力随库水位高低发生变化;三是当前研究聚焦于模型的构建以及优化过程的求解,对于调度规律的提取仍较缺乏,没有基于现有工程体系和供需特点提出水库群联合调度的协同规则。

数学规划是解决复杂系统优化问题的核心工具,常见的线性求解器主要有国外的 CPLEX、Gurobi、Xpress 以及国内的杉数 COPT、LEAVES 等。其中,CPLEX 对线性规划(LP)、混合整数线性规划(MILP)等问题具有较好的求解性能和较高的计算效率。CPLEX 常用于路径优化、船舶及车辆调度等问题^[21-23],在水利行业的应用仍在探索初期。GE 等^[24]利用 CPLEX 进行考虑传播时间的短期发电优化调度模型求解。宁亚伟等^[25]将 CPLEX 优化求解器应用于岳城水库防洪优化调度模型求解中,其优化效果和计算速度均优于 POA 算法,但是其应用对象为单个水库,在库群决策变量成倍增加条件下的适用性有待进一步研究。赵亚威等^[26]针对中长期水量调度模型多变量、多约束、求解困难的问题,采用 CPLEX 对中长期水量调度模型进行求解,其计算效率明显优于遗传算法。王有香^[27]在澜沧江中下游 6 库梯级水库群及泄洪设施防洪优化调度中应用 CPLEX 求解,具有较好的适用性。当前的研究主要集中在防洪调度方面,对于多水源、多对象、变约束条件下的联合供水求解应用仍需进一步探索。

昆明市作为云南省唯一的特大城市,城市扩张和

人口增长较为迅猛,现状各水源开发利用程度和节水水平较高,未来本区域供水及节水挖潜空间较小。2017 年 8 月,滇中引水工程开工建设,预计 2025 年建成通水^[28]。然而,在滇中引水工程通水前,无新增调蓄水源工程的条件下,昆明城市的缺水问题及供水压力仍将存在,充分挖掘昆明市主城区现有水源的供水潜力,成为当前社会各界关注的重点。目前有学者进行了昆明市供水保障方案研究^[29],具有一定参考意义,但是在调度实践中仍然存在不同流域水资源合理配置困难、水库群联合调度规则研究基础薄弱等问题。在遇到干旱或连续多年来水不足的突发事件时,现有水源、应急水源的保障及调度存在一定风险。

本文针对昆明市主城区在滇中引水工程通水前城市供水供需不平衡的问题,构建了水库群联合供水优化调度模型,考虑多水源、多对象、变约束、多目标求解需求,采用 CPLEX 进行求解,研究了不同水平年条件下的水库群供水优化调度方式,分析提炼了适应用水需求和工程格局的联合调度规则。不仅为干旱条件下的水库联合供水调度研究提供了一种新的方法路径,还为未来的昆明市主城区供水调度提供了重要的理论支持和实践指导,研究成果可以为类似条件下的城市供水调度提供参考。

1 昆明市主城区供水概况

1.1 供水水源

滇中引水工程通水前,昆明市目前已形成由常规供水水源和应急供水水源组成的“七库一江”供水格局,各水源工程特性如表 1 所列。

1.1.1 常规供水水源

常规供水水源由云龙、松华坝、清水海 3 座大型水库及宝象河、大河、柴河、自卫村 4 座中小型水库(简称“七库”)组成。云龙水库是掌鸠河引水工程的水源工程,工程任务为主要向昆明城市供水,兼顾发电,最大输水流量为 $69.12 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ^[30]。松华坝水库是昆明城区主要饮用水水源,是昆明唯一不需要远距离输水的大型生命线水源水库,日最大供水能力 79 万 m^3 ^[31]。清水海水库为清水海引水工程的水源工程,工程任务为城市供水,设计年供水量 1.11 亿 m^3 ^[32]。宝象河、大河、柴河、自卫村 4 座中小型水库工程任务均以城市供水为主。

1.1.2 应急供水水源

应急供水水源为牛栏江—滇池补水工程的水源工程——德泽水库,滇中引水工程通水前任务是向滇池

表 1 “七库一江” 工程特性表

Table 1 Characteristics of “Seven Reservoirs and One River” project

水 库	坝址径流/亿 m ³	正常蓄水位/m	正常蓄水位库容/10 ⁸ m ³	死水位/m	死库容/10 ⁸ m ³
云 龙	2. 71	2 089. 67	3. 970	2 054. 17	0. 176
松华坝	1. 79	1 965. 50	1. 050	1 928. 80	0. 050
清水海	1. 20	2 180. 00	1. 486	2 161. 00	0. 433
宝象河	0. 12	2 052. 00	0. 193	2 026. 00	0. 006
柴 河	0. 22	1 949. 00	0. 159	1 938. 59	0. 024
大 河	0. 12	2 019. 05	0. 160	1 999. 05	0. 027
自卫村	0. 07	1 978. 10	0. 011	1 938. 59	0. 001
德 泽	12. 87	1 790. 00	4. 160	1 752. 00	1. 890

补水, 并具备向昆明市应急供水的能力。滇中引水工程通水前, 工程多年平均设计引水量 5. 72 亿 m³, 向滇池补水量 5. 66 亿 m³[33]。牛栏江—滇池补水工程主要由德泽水库水源枢纽工程、干河提水泵站工程及输水线路工程组成。

1. 2 供水片区

昆明市主城区供水范围涉及主城片区和清水海片区, 两大供水片区彼此间尚未完全实现供水管网互连互通。2021 年昆明市城区原水日均供水量为 131. 5 万 m³/d, 其中主城片区和清水海片区分别为 107. 5 万 m³/d、24 万 m³/d。

1. 3 供水水源与供水片区的水力联系

昆明市城区供水水源与各供水片区及水厂水力联系如图 1 所示。昆明市主城片区主要常规供水水源为云龙和松华坝水库。清水海片区主要常规供水水源为

清水海水库。其他散小水源分属于主城片区和清水海片区两个供水系统。德泽水库为昆明市主城片区和清水海片区的应急供水水源。

各水库对供水片区的供水能力如表 2 所列。云龙水库通过掌鸠河引水工程对主城片区进行供水, 当云龙水库水位小于 2 065 m 时, 最大出流量仅 62 万 m³/d; 当水位小于 2 063 m 时, 最大出流量下降至 57 万 m³/d。松华坝水库受取水口高程限制易发生低压缺水情况, 当水位小于 1 951. 5 m 时, 日最大供水能力 54 万 m³/d; 水位小于 1 943 m 时, 日最大供水能力 34 万 m³/d。

2 来水与需水

2. 1 水库来水

以“七库”及德泽水库的原径流设计成果为基础, 并根据水库水文观测资料整编成果、全国第三次

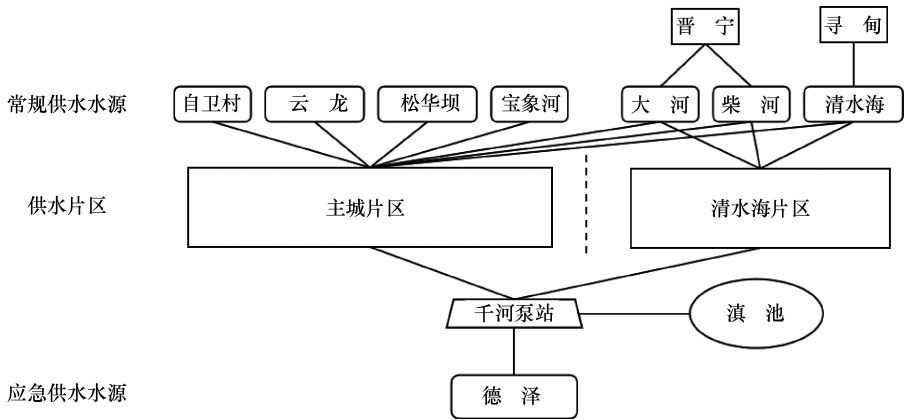


图 1 昆明市城区供水水源与各供水片区及水厂水力联系

Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic connections between water sources and water supply areas in Kunming

表 2 “七库一江” 对供水片区最大供水能力

万 m³ · d⁻¹

Table 2 Maximum water supply capacity of “Seven Reservoirs and One River” for water supply areas

10⁴m³ · d⁻¹

供水片区	对供水片区最大供水能力							
	松华坝	云 龙	清水海	宝象河	大 河	柴 河	自卫村	德 泽
主城片区	79. 00	69. 12	12. 00	3. 40	3. 70	4. 00	4. 00	90. 00
清水海片区	0. 00	0. 00	51. 84	0. 00	1. 97	2. 13	0. 00	30. 00

表 3 “七库一江” 1956—2021 年多年平均径流量

亿 m³

Table 3 Multi-year average runoff of “Seven Reservoirs and One River” (1956—2021)

10⁸ m³

年 份	松华坝	云 龙	清水海	宝象河	大 河	柴 河	自卫村	德 泽
1956—2021 年	1. 79	2. 71	1. 20	0. 12	0. 12	0. 22	0. 07	12. 87

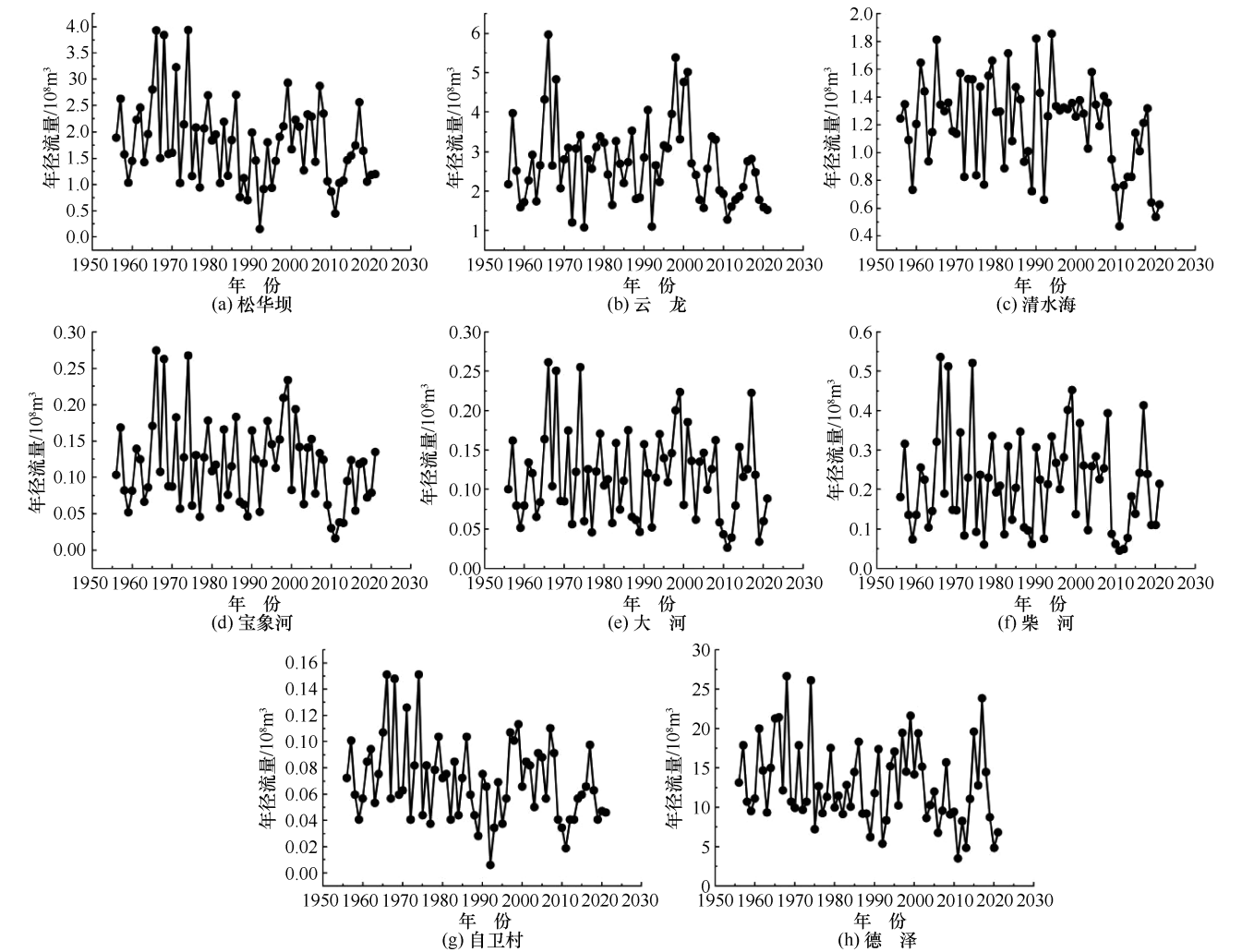


图 2 “七库一江” 1956—2021 年长系列径流过程

Fig. 2 Long-term runoff process of “Seven Reservoirs and One River” (1956—2021)

水资源调查评价成果等, 对各水库坝址径流系列进行还原与插补延长。1956—2021 年“七库”多年平均径流量为 6.21 亿 m³, 德泽水库多年平均径流量为 12.87 亿 m³。

2.2 城市需水

2.2.1 2021 年需水条件

基于 2021 年实际供水数据, 昆明市主城区现状需水量约 4.80 亿 m³, 其中主城片区需水量为 3.92 亿 m³, 清水海片区需水量为 0.88 亿 m³, 年内逐月需水量分布如图 3(a) 所示。

2.2.2 2025 年需水条件

基于经济社会发展预测, 采用定额法确定 2025

年需水条件, 定额的确定以节水优先、高效利用为原则, 结合节水规划和区域水资源条件、气候条件、生活用水习惯等综合考虑。

城镇生活用水方面, 以 2020 年人口为基础, 参考《昆明市“十四五”人口发展专项规划》成果, 预测 2025 水平年昆明市城区总人口将达到 630.36 万人, 城镇综合生活日用水定额为 185 L/人, 考虑 10% 的管网漏及原水输送损水量, 昆明主城五区 2025 年城镇生活毛需水量为 4.65 亿 m³。

工业用水方面, 根据昆明市近年统计年鉴, 结合昆明市“十四五”规划纲要、《昆明市“十四五”工业高质量发展规划》等, 预测昆明市主城五区 2025 年

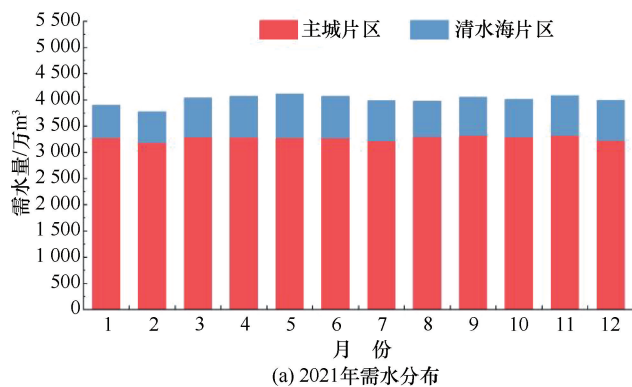
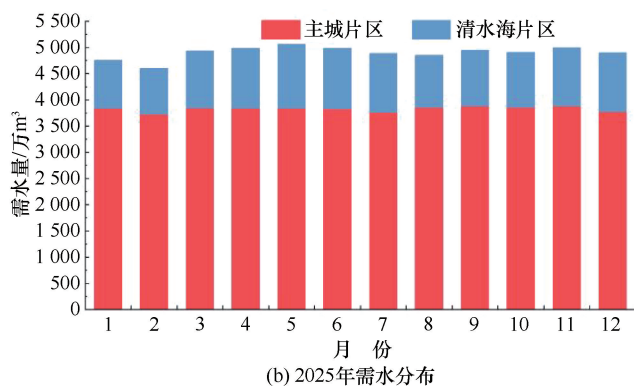


图3 昆明市主城区年内需水分布情况

Fig. 3 Distribution of intra-annual water demand in main urban area of Kunming

工业发展指标为1 648亿元,万元工业增加值用水量定为 5.7 m^3 ,考虑10%的管网漏及原水输送损失量,昆明主城五区2025年工业毛需水量为1.04亿 m^3 。

考虑嵩明杨林镇2021年4月已纳入清水海片区供水,年需水量为1 825万 m^3 ,总体而言,2025年昆明城区供水原水总需水量为5.88亿 m^3 。其中,主城片区4.59亿 m^3 ,清水海片区1.29亿 m^3 ,年内逐月需水量分布如图3(b)所示。

3 水库群联合供水优化调度模型构建

3.1 模型范围及计算工况

以昆明城区供水水源“七库一江”、主城片区及清水海片区两大受水区为研究对象,基于各水源与受水区的水力联系,搭建昆明城区联合供水优化调度模型。在实际供水中,由于柴河、大河水库优先满足晋宁当地用水需求,随着晋宁片区需水量增长,近年已基本不对主城区供水(2020年柴河实际供水量为0,2021年为27万 m^3 ;大河水库2020年、2021年实际供水量均为0),因此在模型计算时暂不考虑柴河、大河水库,昆明城区仅有云龙、松华坝、清水海、宝象河、自卫村等“五库”及德泽水库参与供水。

模型根据计算需求对不同水库群组以及受水区对象的组合情况进行优化求解。本次研究中,不考虑德泽水库供水时,以昆明“五库”为对象进行供水调度优化求解;考虑德泽水库供水时,将德泽水库纳入优化调度模型范围一并求解,并且考虑德泽水库工程任务中对下游生态流量、滇池生态补水的需求。

3.2 约束条件

约束条件考虑水量平衡约束、水库水位约束、水库下泄流量约束、水库供水能力约束。

3.2.1 水量平衡约束

在进行优化求解时,对各水库需考虑水量平衡约

束,具体为

$$V_s + I = V_e + Q + L \quad (1)$$

式中, V_s 为水库时段初水量; I 为水库时段来水量; V_e 为水库时段末水量; Q 为水库时段出库水量; L 为水库时段蒸散发和漏损水量。

对各受水区水量平衡,具体为

$$W = S_{\text{KM}} + S_{\text{DZ}} + G \quad (2)$$

式中, W 为受水区需水量; S_{KM} 为昆明水源水库对受水区供水总量; S_{DZ} 为德泽水库对受水区补水量; G 为受水区城市供水缺水量。

3.2.2 水库水位约束

考虑库水位限制,具体为

$$Z_{\text{low}} \leq Z \leq Z_{\text{up}} \quad (3)$$

式中, Z_{low} 为时段最低水位阈值,一般为死水位; Z 为时段末水位; Z_{up} 为时段最高水位阈值,一般为水库的正常蓄水位,具有防洪任务的水库在汛期最高水位为汛限水位。

3.2.3 水库下泄流量约束

考虑水库下泄流量限制,具体为

$$QD_{\text{low}} \leq QD \leq QD_{\text{up}} \quad (4)$$

式中, QD_{low} 为时段最小下泄水量阈值,一般为下游河道生态流量或生态补水流量; QD 为时段下泄水量; QD_{up} 为时段最大下泄水量阈值,一般为下泄能力,主要在汛期来水较大需要弃水时考虑。

3.2.4 水库供水能力约束

计算时各水库应不超过其最大供水能力,具体为

$$Q \leq QC_{\text{max}} \quad (5)$$

式中, Q 为水库供水量; QC_{max} 为水库在计算时段内的最大供水能力。

考虑不同水位条件下各水库供水能力减小的情况,在模型中设定相应的变约束条件。云龙水库采用分层取水塔进行取水,松华坝采用高低位输水隧洞进

行供水, 二者供水能力均受库水位影响, 当库水位较高时可达最大供水能力, 当库水位低于取水口高程或输水隧洞底板高程时, 供水能力会下降。为了考虑实际供水能力约束对供水的影响, 采用分段函数法对供水能力进行动态约束, 计算公式为

$$QC_{YL}(Z_{YL}) = \begin{cases} 69.12 & Z_{YL} \geq 2\,065 \\ 62 & 2\,063 \leq Z_{YL} < 2\,065 \\ 57 & Z_{YL} < 2\,063 \end{cases} \quad (6)$$

$$QC_{SHB}(Z_{SHB}) = \begin{cases} 79 & Z_{SHB} \geq 1\,951.5 \\ 54 & 1\,943 \leq Z_{SHB} < 1\,951.5 \\ 34 & Z_{SHB} < 1\,943 \end{cases} \quad (7)$$

式中, QC_{YL} 、 QC_{SHB} 分别为云龙水库和松华坝水库在计算时段内的最大供水能力 (m^3/d); Z_{YL} 、 Z_{SHB} 分别为云龙水库和松华坝水库在计算时段初的水位 (m)。

3.3 求解方法

昆明供水系统复杂, 求解目标及变量数量众多。针对这一复杂的多目标优化问题, 本研究采用多目标决策中成熟且常用的分层序列法进行求解。该方法的思想是, 把目标按其重要性(优先级)给出一个序列, 先求出第一个最重要的目标的最优解, 然后在保证前一目标最优解的前提下依次求下一目标的最优解, 一直求到最后一个目标为止, 方法示意图如图 4 所示。分层序列法通常有四个求解参数, 包括: (1) 优先级 P , 多目标决策的优先级, 值越大优先级越高; (2) 权重 W , 线性加权多目标决策权重(在优先级相同的时候发挥作用); (3) 绝对容差 A , 多目标决策时允许的目标函数值的最大降低量; (4) 相对容差 R , 多目标决策时允许的目标函数值的最大降低比率。

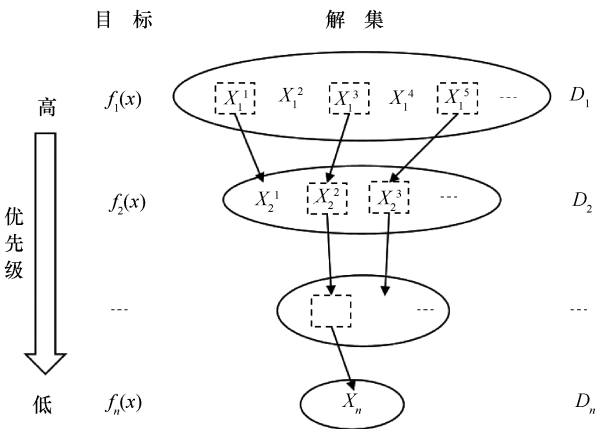


图 4 分层序列法求解多目标问题示意

Fig. 4 Schematic diagram of multi-objective problem solving using lexicographic method

3.4 模型评价指标

为了评价优化调度的效果, 采用供水保证率、单月缺水量、缺水总量、弃水量等特征指标进行分析评价。

供水保证率: 本模型采用长系列月尺度来水及需水进行求解, 以逐月统计供水满足程度计算得到的历时保证率作为供水保证率指标。

单月缺水量: 指当月需水量与供水量的差值。

缺水总量: 长系列调度过程中受水区各月缺水量之和。

弃水量: 水库在满足供水需求、下游生态流量等需求后, 为了满足库水位控制目标多下泄的水量。

3.5 优化目标

清水海水库需要在满足本地寻甸用水的前提下对昆明主城区供水, 据此设置了减小寻甸供水破坏的求解目标, 由于寻甸用水需求较小可以完全满足, 因此将其设置为最高优先级, 对主城区供水求解无影响。由于昆明主城区供需矛盾突出, 为保障城区用水, 以提高城区供水保证率为主要目标对联合调度过程进行求解, 对于“主城片区保证率最高”“清水海片区保证率最高”求解目标, 设置一个较高的优先级以保证获得最高的供水保证率。其次为了优化缺水过程, 以“总缺水量最小”和“最大缺水量最小”设定了相应的求解目标, 优先级较保证率目标低。最后为了减少弃水, 在上述目标达成的基础上, 设定相关目标进一步减少弃水。具体优化目标及优先级参数如表 4 所列, 本研究暂不考虑权重、相对容差、绝对容差的影响, 对同一优先级的目标设定权重为相同值。

表 4 昆明“五库”供水调度优化求解目标

Table 4 Optimization objectives for water supply scheduling of Kunming “Five Reservoirs”

求解目标	优先级
寻甸单月最大缺水量最小	9
寻甸缺水总量最小	9
主城片区保证率最高	6
清水海片区保证率最高	6
主城片区缺水总量最小	4
主城片区单月最大缺水量最小	4
清水海片区缺水总量最小	4
清水海片区单月最大缺水量最小	4
云龙弃水总量最小	1
松华坝弃水总量最小	1
清水海弃水总量最小	1

考虑德泽水库联合调度时, 由于德泽水库为应急水源, 优先满足其下泄流量要求、干河泵站取水任

务, 因此增加相应调度目标以保证其工程任务的完成, 相应优先级高于对主城区供水, 其他优化目标与前述一致, 如表 5 所列。

表 5 昆明“五库”+德泽水库供水调度优化求解目标

Table 5 Optimization objectives for water supply scheduling of Kunming “Five Reservoirs” and Deze reservoir

求解目标	优先级
寻甸单月最大缺水量最小	10
寻甸缺水总量最小	10
德泽下泄单月最大缺水量最小	9
干河泵站单月最大缺水量最小	8
干河泵站缺水总量最小	7
主城片区保证率最高	6
清水海片区保证率最高	6
主城片区缺水总量最小	4
主城片区单月最大缺水量最小	4
清水海片区缺水总量最小	4
清水海片区单月最大缺水量最小	4
云龙弃水总量最小	1
松华坝弃水总量最小	1
清水海弃水总量最小	1

3.6 计算工况

为了分析昆明城区在现状和设计水平年不同调度条件下的可供水量以及供水保证率, 共设置如表 6 所列的 4 个计算工况, 其中工况 1、2 对 2021 现状年供需情况进行分析, 工况 3、4 对 2025 水平年供需情况进行分析。

表 6 昆明城区联合供水计算工况

Table 6 Calculation conditions for joint water supply in urban area of Kunming

序 号	来水系列	需水条件	供水水库
工况 1	1956—2021 年	2021 水平年	“五库”
工况 2	1956—2021 年	2021 水平年	“五库”+德泽水库
工况 3	1956—2021 年	2025 水平年	“五库”
工况 4	1956—2021 年	2025 水平年	“五库”+德泽水库

4 联合供水优化调度结果

4.1 2021 水平年

4.1.1 2021 水平年“五库”联合调度

工况 1 优化调度过程如图 5(a)、图 5(b) 所示, 云龙水库多年平均供水量为 2.09 亿 m³, 松华坝水库多年平均供水量为 1.58 亿 m³, 清水海水库多年平均供水量 1.00 亿 m³, 宝象河、红坡-自卫村等小水源多年平均供水量为 0.14 亿 m³, 经联合调度后各水源水库对昆明城区多年平均总供水量为 4.81 亿 m³, 略小于 2021 年的昆明城区(含寻甸)需水。但是在连续

枯水年情况下, 例如, 2011—2014 年、2020—2021 年条件, 各库供水量仍不能满足城区供水需求。主城片区历时保证率为 90%, 清水海片区历时保证率为 91%, 昆明城区总体历时保证率为 86%。

对松华坝和云龙水库的供水过程分析表明, 虽然松华坝水库对主城片区的最大日供水能力大于云龙水库, 受来水及调节库容的影响, 一般条件下云龙水库对主城片区供水量大于松华坝水库。在来水较丰时(如 1961 年、1979 年、2017 年等), 松华坝水库为了减少弃水供水量增加, 相应云龙水库供水量减少, 总体仍保证了主城片区供水。在松华坝及云龙水库来水较少的时段, 由于云龙水库具备多年调节能力, 此时松华坝和云龙水库的联合供水方式为云龙水库以最大供水能力供水, 松华坝水库在此基础上满足主城片区剩余需水量。

4.1.2 2021 水平年“五库”+德泽水库联合调度

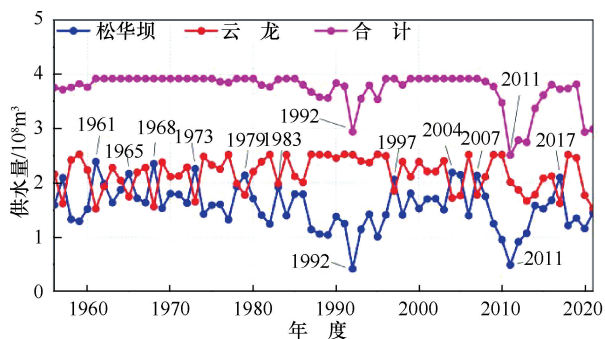
德泽参与联合调度后, 优化调度过程如图 5(c)、图 5(d) 所示。德泽水库在优先满足下泄生态流量需求和干河泵站对滇池补水需求条件下, 对昆明城区多年平均供水量为 0.10 亿 m³, 各水源水库对昆明城区多年平均总供水量为 4.88 亿 m³, 基本满足了 2021 年的昆明城区(含寻甸)需水。主城片区历时保证率为 94%, 清水海片区历时保证率为 95%, 昆明城区总体历时保证率为 92%。

当德泽水库参与联合调度后, 优化调度过程中主城片区松华坝与云龙两大骨干水库的供水配合方式没有改变。在来水较丰时, 松华坝水库较易产生弃水, 相应加大对主城片区供水量以减少弃水; 在来水偏枯时, 为了减少松华坝水库供水压力, 云龙水库以最大供水能力进行供水, 松华坝水库补充满足主城片区剩余需水量。

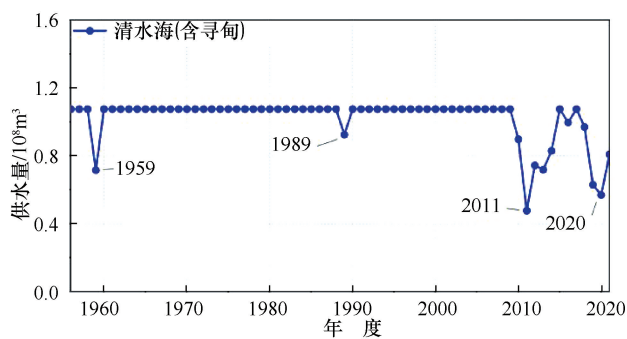
4.2 2025 水平年

4.2.1 2025 水平年“五库”联合调度

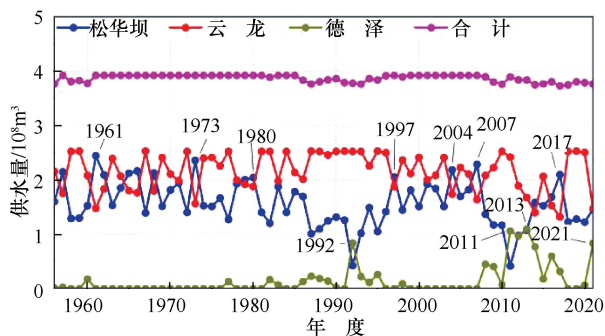
2025 年条件下, “五库”联合调度过程如图 6(a)、图 6(b) 所示。随着昆明城区需水量增长, 主城片区 2021 水平年需水条件下可以满足城区用水需求的部分时段也出现了供水不足的情况, 如 1961—1985 年、1996—2007 年这两个时段内的 1972 年、1975 年、1977 年、1998 年、2003 年。对于偏枯时段, 特别是连续枯水年时段如 1987—1995 年、2010—2014 年、2020—2021 年, 松华坝和云龙水库对主城片区的供水量进一步减少。对于清水海片区, 需水量增长导致水库可蓄水量不足, 同时来水与需水不平衡, 导致清水海水库供水不足的年份明显增多。



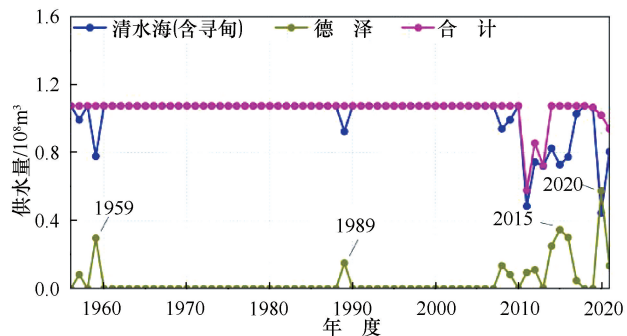
(a) “五库”联合调度主城片区供水过程



(b) “五库”联合调度清水海片区供水过程



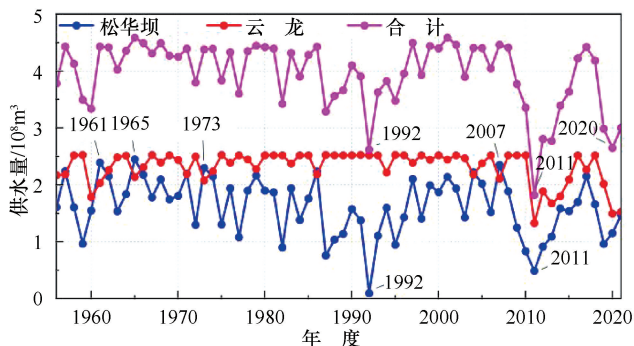
(c) “五库”+德泽联合调度主城片区供水过程



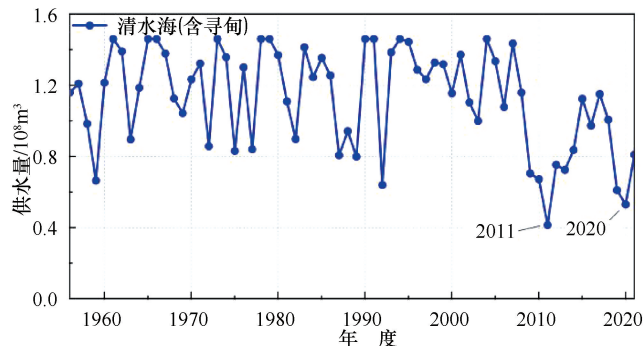
(d) “五库”+德泽联合调度清水海片区供水过程

图 5 2021 年“五库”联合调度条件下年均优化供水过程

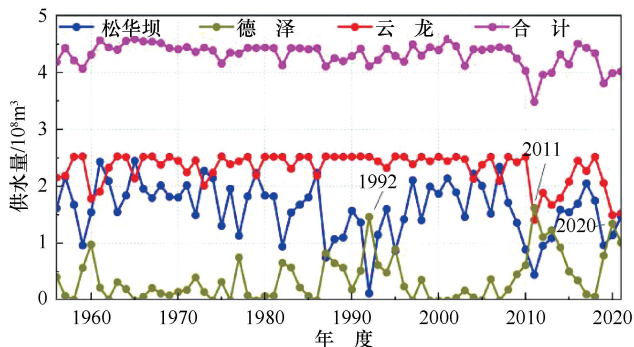
Fig. 5 Optimized annual average water supply process under joint scheduling of “Five Reservoirs” in 2021



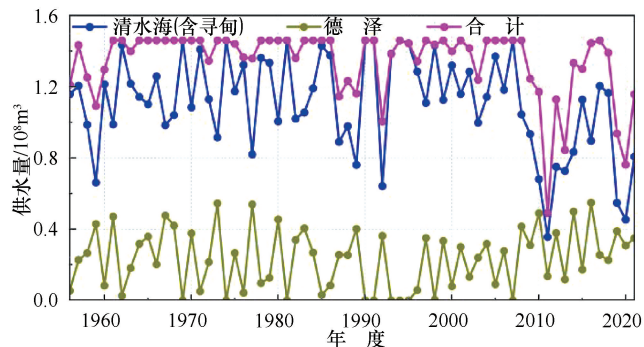
(a) “五库”联合调度主城片区供水过程



(b) “五库”联合调度清水海片区供水过程



(c) “五库”+德泽联合调度主城片区供水过程



(d) “五库”+联合调度清水海片区供水过程

图 6 2025 年“五库”联合调度条件下年均优化供水过程

Fig. 6 Optimized annual average water supply process under joint scheduling of “Five Reservoirs” in 2025

主城片区历时保证率为 71%，清水海片区历时保证率为 61%，昆明城区总体历时保证率为 57%。

在 2025 年需水条件下，受来水及调节能力的影响，松华坝面临更大的供水压力。在长系列优化调度

过程中, 云龙水库的供水优先级更高, 大部分时段云龙水库均以 69.12 万 m³/d 的最大供水能力在进行供水, 松华坝水库相应补充剩余供水。即使以这种最优的联合供水方式, 主城片区供水量仍然难以满足, 供水保证程度较低。

4.2.2 2025 水平年“五库”+德泽水库联合调度

2025 水平年将德泽水库纳入联合优化调度后, 优化调度过程如图 6(c)、图 6(d)所示。德泽水库在优先满足下泄生态流量需求和干河泵站对滇池补水需求条件下, 对昆明城区多年平均供水量为 0.31 亿 m³, 可以进一步减少昆明城区缺水量, 但由于德泽水库受干河泵站过流能力及滇池补水需求限制, 总体缺水量仍较大。主城片区历时保证率为 78%, 清水海片区历时保证率为 79%, 昆明城区总体历时保证率为 74%。

当德泽水库参与联合调度后, 松华坝和云龙联合对主城区供水的方式基本没有发生变化, 仍以云龙持续按最大能力保障基本供水, 松华坝补充剩余蓄水的方式。德泽水库在上述基础上进一步补充供水。

4.3 模型适应性分析

以 2025 水平年条件下的水库群联合调度过程为

例, 分析基于 CPLEX 构建的水库群联合供水优化调度模型对不同条件的适应性, 图 7 是 2025 水平年条件下云龙水库和松华坝水库的逐月水位过程。1997—2001 年为丰水年, 来水频率约 5%, 从图 7、图 6(a)、图 6(c)中可以看出, 当来水较丰时, 云龙水库与松华坝水库可以满足主城区用水需求, “五库”及“五库+德泽”供水条件下的供水过程基本没有变化, 表明模型可较好地协调丰水年条件下流域水库群调度过程, 不额外提出流域外调水需求。2010—2014 年以及 2019—2021 年为特枯水年, 来水频率约为 95% 和 90%, 从图 7(a)及图 6(a)可以看出, “五库”联合调度条件下, 云龙水库在连续枯水年初期持续稳定供水, 库水位持续消落, 汛期回蓄较少; 松华坝水库在连续枯水年初期为增加后期蓄水, 通常维持较高运行水位。然而, 当遭遇特枯水情时, 由于库容较小, 库水位会迅速下降, 且汛期回蓄能力有限, 难以恢复高水位, 导致水库长期处于低水位运行状态。考虑外流域调水补充后, 云龙水库、松华坝水库均可利用外流域调水缓解供水压力, 汛期可以回蓄一定库容, 保障后期供水。综合来看, 基于 CPLEX 构建的水库群联合供水优化调度模型对丰水、特枯水等不同条件的

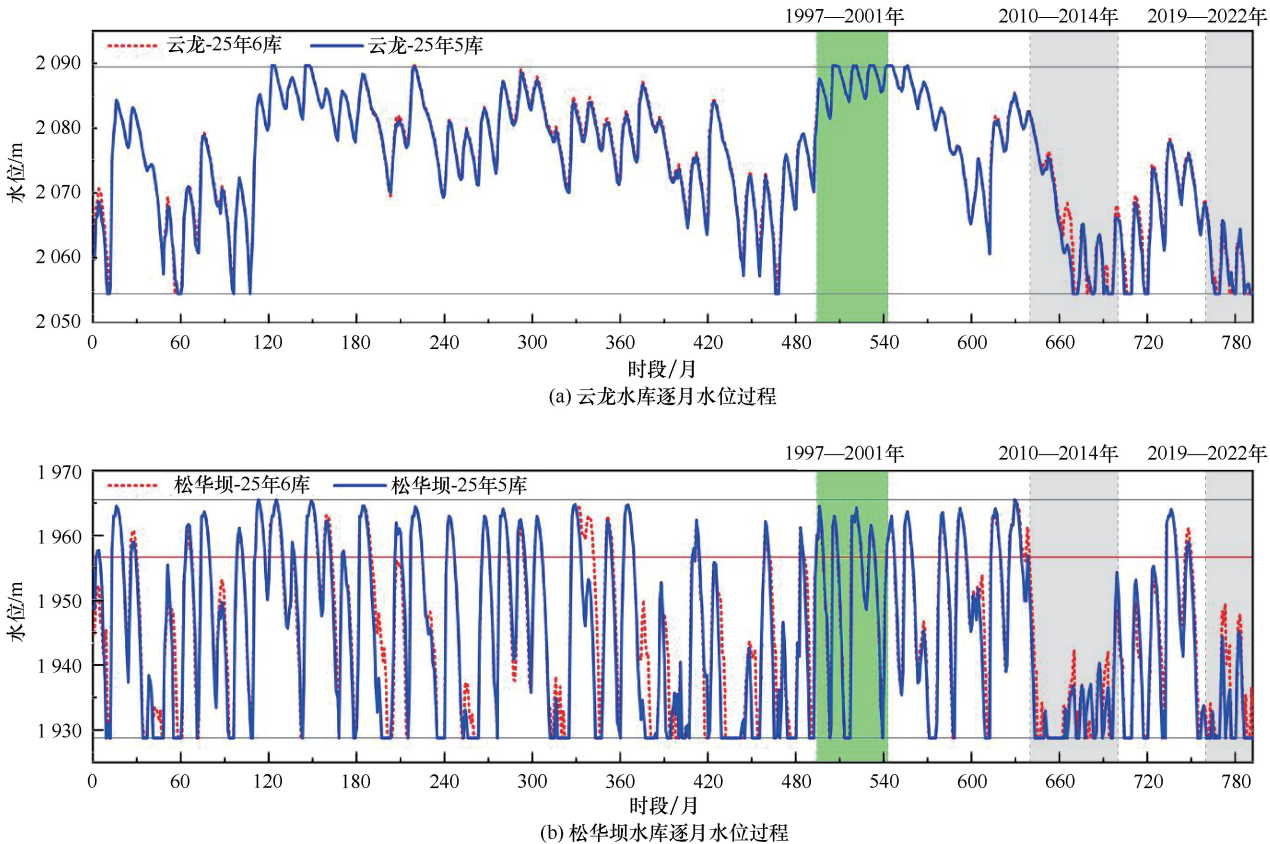


图 7 2025 水平年条件下水库水位过程

Fig. 7 Reservoir water level process under normal year conditions in 2025

均有较好的适应性。

4.4 水库群联合供水调度运用规则

4.4.1 2025 水平年缺水特征

4.4.1.1 主城片区

主城片区发生缺水可分为供水能力限制型缺水和资源性缺水两种类型。

当云龙水库蓄水量能够满足主城片区用水需求时, 由于其最大供水能力仅为 69.12 万 m³/d, 即便蓄水充裕也无法进一步增加供水, 此时出现的缺水主要由松华坝水库供水不足引起, 属于供水能力受限型缺水。当云龙水库与松华坝水蓄水量均无法满足主城片区用水需求时, 缺水主要由两库水资源不足导致, 属于资源型缺水。从两库工程特性^[28-29]来看, 云龙水库库容系数较大, 具备多年调节能力; 松华坝水库库容系数较小, 仅具备年调节能力。在枯水年份, 云龙水库可依靠前期蓄水对供水形成有效支撑, 但受最大供水能力限制, 难以进一步增加供水量; 而松华坝水库因库容受限更易出现蓄水不足, 成为主城片区缺水的主要来源, 进而影响城区供水安全。上述缺水表现与两库工程特性高度一致。

对长系列优化调度过程中的缺水类型占比进行统计(见图 8), 结果显示: 在总共 234 个缺水月份中, 供水能力限制型缺水有 159 个月, 资源性缺水有 75 个月。由此可见主城片区发生缺水的主要原因是供水能力限制(占比约为 67.9%), 即云龙水库无法进一步加大供水、此时松华坝水库的水资源不足是导致主城片区缺水的主要原因。

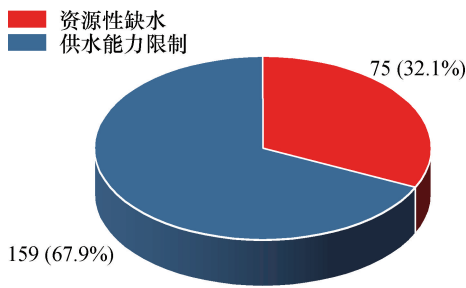


图 8 主城区缺水类型占比

Fig. 8 Proportion of water shortage types in main urban area

4.4.1.2 清水海片区

清水海片区由清水海水库作为主要水源, 而清水海水库具备同时向主城片区和清水海片区供水的能力。长系列调度过程中, 清水海水库在仅对清水海片区(含寻甸)供水的情况下仍无法满足清水海片区的用水需求, 同时未出现汛期弃水现象, 因此清水海水库水资源不足是造成清水海片区缺水的原因。

4.4.2 水库群供水分配规律

主城片区供水主要由云龙和松华坝两座水库承担, 根据 1956—2021 年长系列优化调度结果, 总结松华坝和云龙水库各月供水量分布如表 7 所列, 表中所示供水量均为日均值。在长系列优化调度的 792 个供水月中, 云龙水库有 667 个月处于满供状态。可见, 主城片区供水量调度分配主要原则为云龙水库按照设计最大供水量 69.12 万 m³/d 平稳供水, 剩余需水量由松华坝来进行补充。松华坝和云龙水库的供水量分配也根据遭遇的来水和水库状态也在进行着调整, 当汛期松华坝来水较大将产生弃水时, 可相应加大松华坝供水量以提高水资源利用率, 同时增加云龙水库蓄水量。

清水海片区主要由清水海水库承担供水任务, 清水海水库一般不对主城片区进行供水, 仅当汛期来水较大产生弃水且不影响后期供水时, 清水海水库可配合向主城片区供水。

4.4.3 调整水库群调度方式的条件

基于优化调度中的松华坝水库供水过程, 分析了松华坝加大供水的条件。一方面, 从时间上来看, 由于松华坝 8 月份限制库容为 8 775 万 m³(汛限水位对应库容), 更加容易产生弃水, 松华坝按最大供水能力(79 万 m³/d)供水多集中在汛期 7—9 月份, 数量都在 10 个月以上, 其中 8 月份最多, 达到了 15 个月。另一方面, 从预测蓄水条件来看, 松华坝完全满供的月份有 58 个, 其中对应预测未来 1 个月产生弃水的有 16 个月, 对应预测未来 2 个月产生弃水的有 28 个月, 对应预测未来 3 个月产生弃水的有 33 个月, 对应预测未来 4 个月产生弃水的有 33 个月。因

表 7 松华坝和云龙水库日供水量分布

Table 7 Distribution of daily water supply from Songhuaba Reservoir and Yunlong Reservoir

水 库	统计值	供水量区间/万 m ³ ·d ⁻¹							
		<10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
松华坝	月 数	87	70	34	2	163	311	46	60
松华坝	占比/%	11	9	4	0	21	39	6	8
云 龙	月 数	4	10	18	31	47	15	667	—
云 龙	占比/%	1	1	2	4	6	2	84	—

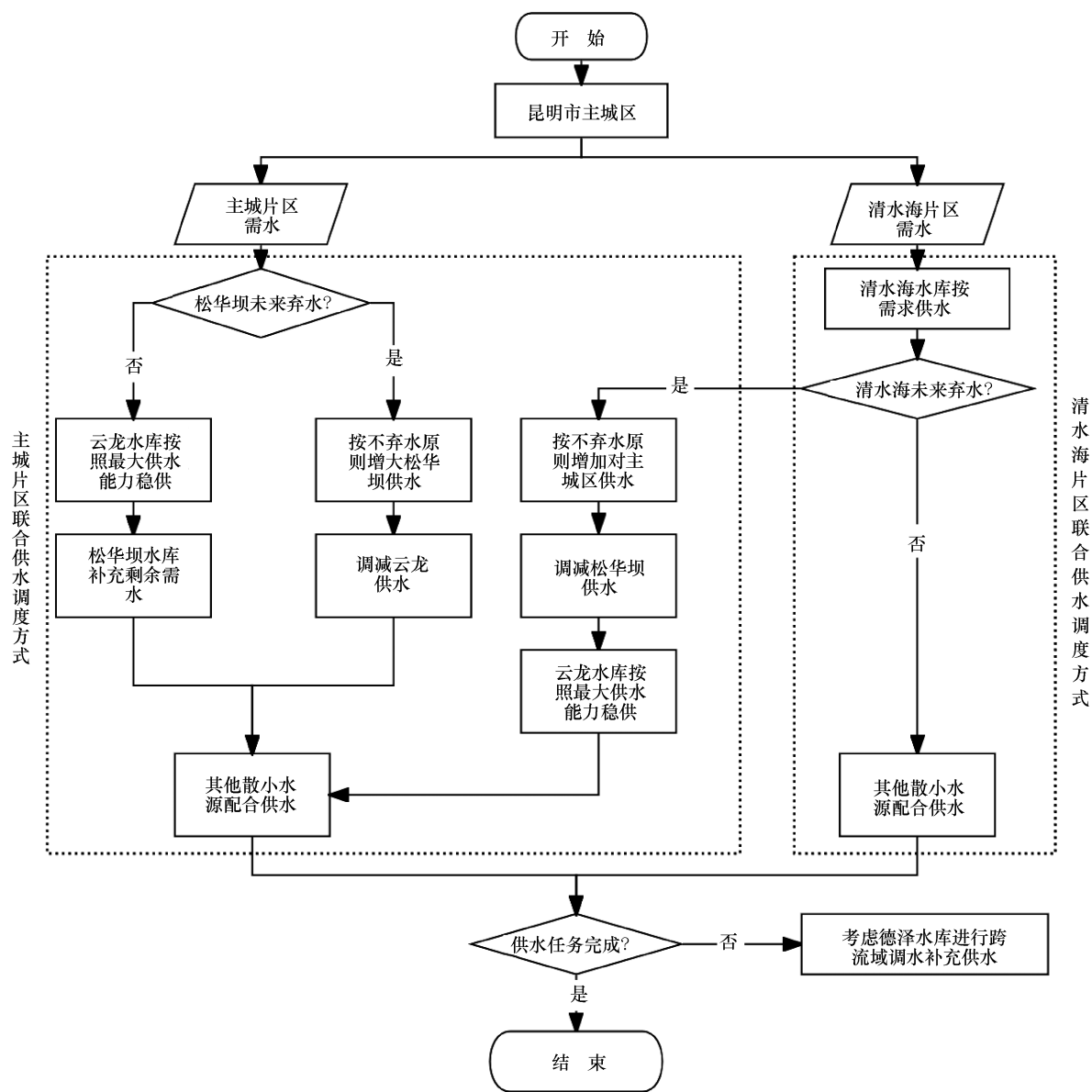


图 9 昆明市主城区水库群联合供水调度方式流程

Fig. 9 Flowchart of joint water supply scheduling method for reservoir group in main urban area of Kunming

此,初步可以将汛期 7—9 月份,根据来水预测,未来 3 个月末松华坝会产生弃水,作为加大松华坝供水量的条件。

4.4.4 联合供水调度方式

根据上述供水规律,提出昆明市主城区水库群“主水源稳供、辅助水源调剂、散小水源补充”的联合供水调度方式,可提高城市供水保障程度,具体流程如图 9 所示。本研究提出联合供水调度方式主要适用于滇中引水工程通水前,在滇中引水工程通水后,对城镇生活用水、农业灌溉、湖泊补水具有较大补充,本研究提出联合供水调度方式需进一步优化,调度目标从保障城市供水转向提高水资源综合利用效益,流域内外水源的协同联合调度方式将会发生

改变。

5 结论与展望

针对城市供水保障问题,利用线性规划构建了水库群联合供水优化调度模型,以昆明城市供水问题为例,对供水过程进行优化分析,总结提炼了昆明市水源水库群联合供水调度规则,结论如下。

(1)基于 CPLEX 构建的水库群联合优化调度模型,能够有效协调水源供水过程,显著提升枯水条件下城市供水保证率。在 2021 年需水条件下,通过昆明市水源水库以及德泽水库联合调度,城市供水保证率可达 92%,基本可解决该水平年缺水问题;在需水增长的 2025 年,通过联合调度仍可显著缓解供水

压力。

(2)识别了昆明市城市供水保证率不足的主要原因,受来水偏枯及工程体系影响,主城区供水能力限制导致的缺水占比达 67.9%,水资源不足导致的缺水情况占比为 32.1%;清水海片区主要受水资源不足影响导致缺水。

(3)基于水库群联合供水优化调度过程,提出了昆明市主城区水库群“主水源稳供、辅助水源调剂、散小水源补充”的联合供水调度方式如下。

①主水源稳供:对于主城片区,云龙水库一般按照最大供水能力稳定保持供水;清水海片区以清水海水库独立供水为主;

②辅助水源调剂:松华坝水库补充主城片区剩余需水量,当来水较多且将产生弃水时,松华坝水库可加大供水,帮助云龙水库存蓄水量;当汛期清水海水库来水较大产生弃水且不影响后期供水时,可配合向主城片区供水;

③散小水源补充:宝象河水库、自卫村水库、大河水库、柴河水库等散小水源在上述基础上配合供水。

(4)滇中引水工程通水以前,昆明城市供水高度依赖现有水库群的精细化和协同化调度,随着用水需求增加,应考虑德泽水库应急供水的常态化研究。滇中引水工程通水后,昆明市将增加新水源,水资源缺乏问题将得到极大缓解,建议引入不确定性分析或多目标优化算法以提升模型弹性与广泛适应性,持续研究滇中引水工程通水后昆明城区水库联合供水调度方式。

参考文献(References):

- [1] OUYANG S, QIN H, SHAO J, et al. Multi-objective optimal water supply scheduling model for an inter-basin water transfer system: The South-to-North Water Diversion Middle Route Project, China[J]. Water Supply, 2020, 20(2): 550-564.
- [2] HE J B. The application of fuzzy neural network algorithm in intelligent scheduling of urban water supply system[J]. Procedia Computer Science, 2025, 262: 108-114.
- [3] HAN Y L, DONG Z C, CUI C, et al. Multi-objective optimization scheduling for extensive plain lake water resources incorporating flood resource utilization[J]. Journal of Hydrology, 2025, 651: 132584.
- [4] 张庆华, 颜宏亮, 宋学东, 等. 多水库联合供水的优化调度方法[J]. 人民长江, 2006, 37(2): 30-32.
- ZHANG Q H, YAN H L, SONG X D, et al. Optimal operation method for joint water supply of multiple reservoirs[J]. Yangtze River, 2006, 37(2): 30-32.

- [5] 吴凌琴, 张猛, 沈喜, 等. 基于多目标优化的赣抚平原灌区水资源输配水联合模型研究[J]. 节水灌溉, 2025(10): 36-41.
- WU L Q, ZHANG M, SHEN X, et al. Research on the combined model of water resources transfer and distribution in Ganfu Plain irrigation area based on multi-objective optimization[J]. Water Saving Irrigation, 2025(10): 36-41.
- [6] LIU R M, LIU Y, JIAO L J, et al. Multi-objective optimization of reservoir group operation after Inter-basin water transfer jointing SWAT model and NSGA-II[J]. Journal of Hydrology, 2025, 660: 133431.
- [7] BAHRAMI N, REZA NIKOO M, AL-RAWAS G, et al. Reservoir optimal operation with an integrated approach for managing floods and droughts using NSGA-III and prospect behavioral theory[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127961.
- [8] 杨子桐, 方国华, 叶健, 等. 统筹防洪、供水、生态的流域水资源系统优化调度研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 71-78.
- YANG Z T, FANG G H, YE J, et al. Research on optimization and scheduling of watershed water resources system for integrated flood control, water supply, and ecology[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 71-78.
- [9] 程翰森, 刘招, 叶书华, 等. 水库群洪水资源化调度对来水预报不确定性影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(4): 43-52.
- CHENG H S, LIU Z, YE S H, et al. Effect of flood resources utilization for water supply reservoir group on in flow forecasting uncertainty[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2025, 36(4): 43-52.
- [10] 黄生志, 闫俊, 郭怿, 等. 面向关中地区水网韧性提升的水库群优化调配研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 258-267.
- HUANG S Z, YAN J, GUO Y, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 258-267.
- [11] 李成振, 孙万光, 陈晓霞, 等. 有外调水源的库群联合供水调度方法的改进[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1272-1279.
- LI C Z, SUN W G, CHEN X X, et al. The improvement of joint operation for multi-reservoir water supply system with external water resource[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(11): 1272-1279.
- [12] 康艳, 高轩, 李伶杰, 等. 供水水库群蓄供水次序与调度图双层优化研究[J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1240-1250.
- KANG Y, GAO X, LI L J, et al. A bilayer optimization method of water storing-supplying sequence and operation diagram for water supply reservoir group[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1240-1250.
- [13] 赵思琪, 徐炜, 陈思, 等. 基于改进调度图的跨流域水库群供水调度研究[J]. 人民珠江, 2023, 44(10): 62-70.
- ZHAO S Q, XU W, CHEN S, et al. Water supply scheduling for cross-basin reservoir groups based on improved scheduling diagram

- [J]. Pearl River, 2023, 44(10): 62-70.
- [14] 黄生志, 闫俊, 郭怿, 等. 面向关中地区水网韧性提升的水库群优化调配研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 259-267.
HUANG S Z, YAN J, GUO Y, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 259-267.
- [15] 温天福, 邹钰, 游进军, 等. 基于 MIKE Basin 的袁河流域枯水期水库群联合供水调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 33-44.
WEN T F, ZOU Z, YOU J J, et al. Study on coordinated water supply scheduling of reservoir groups during dry season in Yuanhe River Basin based on MIKE Basin model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 33-44.
- [16] 彭勇, 徐炜, 姜宏广. 深圳市西部城市供水水库群联合调度研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11): 74-83.
PENG Y, XU W, JIANG H G. Joint operation of multi-reservoirs in the west of Shenzhen[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11): 74-83.
- [17] 于冰, 梁国华, 何斌, 等. 城市供水系统多水源联合调度模型及应用[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 874-884.
YU B, LIANG G H, HE B, et al. Modeling of joint operation for urban water-supply system with multi-water sources and its application[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 874-884.
- [18] KIM S, HWANG S, LEE H, et al. Assessment of agricultural watershed water budget considering upstream water budget against reservoir discharge and agricultural water supply[J]. Agricultural Water Management, 2025, 316: 109587.
- [19] TAN L, WANG W Q, WANG Z Z, et al. Optimizing water transfer rules of a drinking water source reservoir considering water quality, quantity, and ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2025, 663: 134227.
- [20] GOU H X, MA C, LIU W W, et al. Adaptive water management under coal-fired power phase-out: Reshaping of water supply-demand patterns and new equilibrium for cascade reservoir reoperation[J]. Water Research, 2025, 284: 124038.
- [21] 刘成昊, 徐金华, 梁淑娟, 等. 多卡车-多无人机灵活协同路径问题优化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(11): 85-94.
LIU C H, XU J H, LIANG S J, et al. Optimization approach for multiple trucks and drones flexible collaboration routing problem[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(11): 85-94.
- [22] 胡平华, 吴禄彬, 袁梦, 等. 考虑异质船队与吃水约束的海上船舶调度优化[J]. 交通运输工程与信息学报, 2026, 24(4): 28-38.
HU P H, WU L B, YUAN M, et al. Optimization of maritime ship scheduling with heterogeneous fleet and draft limits[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2026, 24(4): 28-38.
- [23] TANG M Y, ZHANG Y W, NIU W X, et al. A sequential optimization method for joint allocation of berth and yard with cluster stacking strategy in container terminals[J]. Ocean Engineering, 2025, 341: 122484.
- [24] GE X L, ZHANG L Z, SHU J, et al. Short-term hydropower optimal scheduling considering the optimization of water time delay[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 110: 188-197.
- [25] 宁亚伟, 任明磊, 张俊彬, 等. 优化求解器在水库防洪调度中的应用研究[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(3): 15-20.
NING Y W, REN M L, ZHANG J B, et al. Research on the application of optimization solver in flood operation for reservoirs[J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(3): 15-20.
- [26] 赵亚威, 方洪斌. 线性求解器在中长期水量调度中的应用研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(1): 82-86.
ZHAO Y W, FANG H B. Application of linear programming solver in mid-long term water dispatch[J]. Yellow River, 2023, 45(1): 82-86.
- [27] 王有香. 梯级水库群及其泄洪设施防洪调度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
WANG Y X. Study on Flood Control by Operating Cascaded Reservoirs and Their Flood Discharge Facilities[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [28] 李波, 曹正浩. 滇中引水工程水资源配置方案研究[J]. 水利水电快报, 2020, 41(1): 13-16.
LI B, CAO Z H. Study on water resources allocation for Central Yunnan Water Diversion Project[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2020, 41(1): 13-16.
- [29] 王绍春. 昆明城市抗旱应急供水方案探析[J]. 水利规划与设计, 2013(6): 26-30.
WANG S C. Analysis of Kunming City's Drought Emergency Water supply plan[J]. Water Resources Planning and Design, 2013(6): 26-30.
- [30] 云南省水利水电勘测设计研究院. 昆明市掌鸠河引水供水工程初步设计水源工程(云龙水库)第一册说明书[R]. 昆明: 云南省水利水电勘测设计研究院, 1999.
Yunnan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute. Preliminary Design Report for the Water Source Project (Yunlong Reservoir) of the Kunming Zhangjiu River Water Diversion and Supply Project: Volume 1[R]. Kunming: Yunnan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute, 1999.
- [31] 云南省水利水电勘测设计研究院. 昆明市松华坝水库加固扩建工程初步设计补充报告[R]. 昆明: 云南省水利水电勘测设计研究院, 1993.
Yunnan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute. Supplementary Report on the Preliminary Design for the Reinforcement And Expansion Project of Songhuaba Reservoir in Kunming[R]. Kunming: Yunnan Provincial Water

Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute, 1993.

- [32] 云南省水利水电勘测设计研究院. 昆明市清水海供水及水源环境管理项目引水工程(一期)初步设计报告[R]. 昆明: 云南省水利水电勘测设计研究院, 2007.

Yunnan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute. Preliminary Design Report for the Water Diversion Project (Phase I) of the Kunming Qingshuihai Water Supply and Water Source Environment Management Project [R]. Kunming: Yunnan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute, 2007.

- [33] 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南省水利水电勘测

设计研究院. 牛栏江—滇池补水工程可行性研究报告[R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院、云南省水利水电勘测设计研究院, 2008.

HydroChina Kunming Engineering Corporation, Yunnan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute. Feasibility study report for the Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project [R]. Kunming: HydroChina Kunming Engineering Corporation, Yunnan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute, 2008.

(责任编辑 王海锋)