

# 金沙江下游梯级受端电网消纳空间分析方法

郭乐<sup>1</sup>, 席荣光<sup>2</sup>, 舒卫民<sup>1</sup>, 申建建<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中国长江电力股份有限公司梯级调度通信中心, 湖北 宜昌

<sup>2</sup>大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2023年8月9日; 录用日期: 2023年9月13日; 发布日期: 2023年10月9日

## 摘要

特大流域水电站群跨省跨区送电与受端负荷需求、本地电源特点等密切相关, 需要准确分析不同时空的电网平衡需求以确定合理的消纳空间。本文以金沙江下游梯级送电工程为背景, 考虑受端电网调峰和本地清洁能源消纳需求, 提出电量消纳空间分析方法。该方法以受端火电机组为调节单元, 其他类型电源采用典型运行方式, 利用逐月典型日电力电量平衡理论分别构建受端电网最小、最大消纳电量的混合整数线性规划模型。以某受端电网为对象分析确定全年逐月省外电量消纳能力, 并与2021年实际受电量对比。结果表明, 除2月外各月省内供电能力均难以满足用电需求, 1月、6~8月、12月负荷大, 具有较强的省外电量消纳能力, 且实际受电量处于消纳空间中位值, 验证了最大、最小消纳边界的有效性, 为合理安排梯级水电站送电计划提供了决策支持。

## 关键词

受端电网, 消纳空间, 调峰, 金沙江, 梯级电站, 电力电量平衡

## Power Consumption Space Analysis Method of Receiving Power Grid for Cascaded Hydropower Stations in the Downstream of Jinsha River

Le Guo<sup>1</sup>, Rongguang Xi<sup>2</sup>, Weimin Shu<sup>1</sup>, Jianjian Shen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Cascade Dispatching Communication Center, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang Hubei

<sup>2</sup>College of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Received: Aug. 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 9<sup>th</sup>, 2023

作者简介: 郭乐(1984.07-), 湖北广水, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为水文预报和水库优化调度。Email: guo\_le@ctg.com.cn  
\*通讯作者 Email: shenjj@dlut.edu.cn

文章引用: 郭乐, 席荣光, 舒卫民, 申建建. 金沙江下游梯级受端电网消纳空间分析方法[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 463-471.  
DOI: 10.12677/jwrr.2023.125051

## Abstract

The cross provincial and cross regional power transmission of large hydropower stations in a river basin is closely related to the load demand of the receiving power grid and the characteristics of local power sources. It is necessary to accurately analyze the load balancing demand for power grid of different time and space to determine appropriate consumption space. This article takes the actual power transmission project of cascade hydropower stations in the downstream of Jinsha River as background, and proposes analysis method for power consumption space considering the peak shaving of the receiving power grid and the demand of local clean energy consumption. This method takes the thermal units of the receiving power grid as the regulating unit, while other types of power sources use typical operating methods. By balancing the typical daily electricity consumption each month, mixed integer linear programming models for the minimum and maximum consumption of the receiving power grid are constructed to analyze and determine the monthly electricity consumption capacity of receiving power grid, and compare it with the actual electricity received from outside the province in 2021. The results indicate that the local power supply capability is difficult to meet the electricity demand in all months except February. The loads in January, from June to August, and December are large, so that the ability to consume power from outside the province in these months is strong, and the actual electricity received from outside the province of the power grid is at an intermediate level of consumption space. The results confirm the validity of the maximum and minimum consuming boundary and provide decision-making support for the suitable arrangement of the transmission plans for cascade hydropower stations.

## Keywords

Receiving Power Grid, Consumption Space, Peak-Shaving, Jinsha River, Cascaded Hydropower Stations, Power and Electricity Balance

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

金沙江下游梯级水电站乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝位于我国最大的水电基地金沙江水电基地，上接金沙江上中游梯级电站，下游与三峡、葛洲坝相邻，金沙江下游四座电站总装机容量 4646 万 kW，年发电量接近 2000 亿 kW·h，其中白鹤滩装机容量排名世界第二，溪洛渡排名世界第四，乌东德排名世界第六，它们与金沙江 - 长江干流水电站一起组成了世界上最大的水电站群[1]。金沙江下游梯级是我国西电东送骨干电源，通过昆柳龙、禄高肇、白江、白浙、宾金、牛从、复奉等特高压直流跨省跨区送电至东部及沿海地区，是受端电网不可或缺的重要外部电源[2]，所以合理安排送电计划至关重要。事实上，特大流域水电站群跨省跨区送电与受端负荷需求、本地电源特点等密切相关，既要考虑清洁能源消纳，同时需要有效响应受端电网复杂调峰要求[3][4]，因而非常有必要分析受端电网不同时空的平衡需求以确定合理的消纳空间，这样就可以根据受端消纳能力确定适合的梯级送电方案。

目前已有许多学者开展了水电跨省跨区消纳研究，取得了重要研究成果，文献[5]在考虑多电网调峰需求下开展了跨流域梯级水电的消纳调度研究，所提方法能够满足多电网调峰和水电消纳需求；文献[6]构建了水电 - 风电联合消纳调度模型，所得策略可促进风电消纳；文献[7]分析了我国水电跨省区输送特点和跨省区消纳面临

的多电网调峰难题；文献[8]提出了一种基于火电分级调峰深度的水电跨省消纳空间分析方法；文献[9]构建了一种水电跨省区多电网调峰协调分配方法，缓解梯级水电多电网调峰调度问题。上述研究大多集中在发电侧水电优化调度，而鲜有关注受端电网消纳外来电量的能力。

为此，本文以金沙江下游梯级水电站跨省跨区送电工程为背景，根据受端电网实际运行状况，考虑各类电源复杂运行约束，提出一种梯级水电站受端电网消纳空间分析方法。该方法在考虑受端电网新能源典型运行方式基础上构建等效负荷过程，并以受端主要调节电源火电机组典型日运行状态为二进制变量分别构建计算最小和最大消纳电量的混合整数线性规划模型，确定金沙江下游梯级受端电网各月消纳空间。

## 2. 模型构建

金沙江下游梯级水电站的受端电网以火电为主，不可控的风光等清洁能源为辅，省外输送电量集中在汛期，外来电量年内分配既影响本地清洁能源消纳，又可能加剧电网的调峰压力。因此，在缓解受端电网调峰压力与受端电网本地清洁能源消纳的前提下，开展受端电网消纳空间分析，确定各月消纳省外电量的能力，为合理安排金沙江下游梯级水电站送电计划提供决策支持。受端电网消纳空间分析步骤如下：

1) 构建等效负荷过程。根据受端电网实际运行负荷数据选择典型日，考虑事故备用容量后构建典型负荷过程，根据典型负荷与本地新能源出力之差构建等效负荷过程。

2) 确定最小消纳空间。在等效负荷低谷时段，受端电网火电以深度调峰或最小技术出力运行确定火电最大开机台数，并根据高峰时段电力电量缺口计算典型日省外输电过程，将典型日省外输电过程对时间积分得到省外输电量，最后根据典型日省外输电量与各月天数的乘积确定受端省份各月最小消纳空间。

3) 确定最大消纳空间。在等效负荷高峰时段，扣除考虑季节性输送能力的通道最大输送电力后确定火电开机容量，依据低谷时段经火电深度调峰后的剩余等效负荷调整省外输电过程。将典型日省外输电过程对时间积分得到省外输电量，最后根据典型日省外输电量与各月天数的乘积确定各月最大消纳空间。

### 2.1. 目标函数

根据上述思路，在计算受端电网最小消纳电量时，以省外购电量最小为优化目标，目标函数可表述为：

$$\min \sum_{t=1}^{96} P_t^{line} \times 0.25 \times n \quad (1)$$

在计算受端电网最大消纳电量时，以省外购电量最大为主要目标、省内电量供需不平衡量最小为次要目标，构建多目标优化模型，具体目标函数为：

$$\max \sum_{t=1}^{96} P_t^{line} \times 0.25 \times n \quad (2)$$

$$\min 0.25 \times n \times \sum_{t=1}^{96} (P_t^{rich} + P_t^{lack}) \quad (3)$$

式中：0.25 表示单位转化系数； $P_t^{line}$  表示省外输电线路在典型日各时段  $t$  的出力，MW； $n$  表示各月天数； $P_t^{rich}$  表示受端电网在低谷时段  $t$  富余电力，MW； $P_t^{lack}$  表示高峰时段  $t$  电力缺口，MW。

### 2.2. 约束条件

1) 等效负荷约束

$$\beta P_t - P_t^{solar} - P_t^{wind} = P_t^{equ} \quad (4)$$

式中： $\beta$  表示事故备用容量系数， $P_t$  表示某月选取的典型日负荷过程，MW； $P_t^{solar}$  表示受端电网典型日太阳能

时段  $t$  的出力, MW;  $P_t^{wind}$  表示受端电网典型日风能时段  $t$  的出力, MW;  $P_t^{equ}$  表示典型日负荷过程考虑事故备用容量及扣减本地新能源发电过程后的等效负荷过程, MW。

### 2) 火电机组运行约束

$$\mu \times P_{\min}^{fire} \leq P_t^{fire} \leq \mu \times P_{\max}^{fire} \quad (5)$$

$$P_{\min}^{fire} = \gamma \times N^{fire} \quad (6)$$

式中:  $P_t^{fire}$  表示火电机组在时段  $t$  的出力, MW;  $P_{\min}^{fire}$  表示火电机组的最小技术出力, 通常与火电机组调峰深度有关, MW;  $P_{\max}^{fire}$  表示火电机组的最大出力, MW;  $N^{fire}$  表示火电机组的装机容量, MW;  $\gamma$  表示火电机组调峰深度;  $\mu$  表示火电机组运行状态, 采用二进制变量。

### 3) 火电机组出力爬坡约束

$$\left| P_{t+1}^{fire} - P_t^{fire} \right| \leq \alpha \times \Delta t \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  表示火电机组的每分钟爬坡速率, MW/min;  $\Delta t$  表示出力时段取 15 min。

### 4) 火电机组年利用小时数约束

$$0.25 \times \sum_{t=1}^{96} P_t^{fire} \geq E_{fire} \quad (8)$$

式中:  $E_{fire}$  表示火电机组最小年利用小时分配到各月典型日后的火电发电量, MW·h, 采用受端省份火电各月利用小时数和年总利用小时数按比例分配至各月后按各月天数平均分配到各典型日。

### 5) 核电运行约束

$$P_t^{nuclear} = p_{cons} \quad (9)$$

式中:  $P_t^{nuclear}$  表示核电站在时段  $t$  的出力, MW;  $p_{cons}$  表示核电站各时段出力, 通常可取为受端电网核电装机容量, MW。

### 6) 气电运行约束

$$0.25 \times \sum_{t=1}^{96} P_t^{gas} \times \Delta t = E^{gas} \quad (10)$$

$$0 \leq P_t^{gas} \leq N^{gas} \quad (11)$$

式中:  $P_t^{gas}$  表示气电机组在时段  $t$  的出力, MW;  $E^{gas}$  表示各气电机组在各月典型日的发电量, MW·h;  $N^{gas}$  表示气电机组的装机容量, MW。

### 7) 水电典型运行方式约束

$$P_t^{hydro} = P_t^{hydro} \quad (12)$$

$$P_t^{hydro} = \{P_t^{hydro}, kP_t^{hydro}\} \quad (13)$$

式中:  $P_t^{hydro}$  表示受端电网水电典型运行方式, 式(12)表示受端电网水电在汛期不参与电网调峰时的时段出力, MW; 式(13)表示在枯水期参与受端电网调峰时的出力, MW;  $k$  为枯水期水电高峰与低谷时段出力比。

### 8) 输电线路容量约束

$$0 \leq P_t^{line} \leq N^{line} \quad (14)$$

式中:  $P_t^{line}$  表示省外输电线路在典型日各时段  $t$  的出力, MW;  $N^{line}$  表示输电线路的输送容量, MW。

### 9) 等效负荷平衡约束

$$P_t^{equ} = P_t^{fire} + P_t^{gas} + P_t^{hydo} + P_t^{nuclear} \quad (15)$$

$$P_t^{equ} = P_t^{line} + P_t^{fire} + P_t^{gas} + P_t^{nuclear} + P_t^{hydo} + P_t^{lack} - P_t^{rich} \quad (16)$$

$$P_t^{rich} \geq 0 \quad (17)$$

$$P_t^{lack} \geq 0 \quad (18)$$

式中：式(15)、式(16)分别用于计算受端省份最小、最大消纳空间时的等效负荷平衡约束。

### 2.3. 模型求解方法

本研究分别构建受端电网最小消纳空间和最大消纳空间两个模型，各模型均采用混合整数线性规划(MILP)进行求解，混合整数线性规划方法因其具有运算效率高、计算结果稳定等诸多优点，在水利、电力、能源等领域得到了广泛应用[10] [11]。本文以受端电网火电机组为调节单元，机组运行状态为二进制变量，构建混合整数线性规划模型，并采用商业软件包实现高效求解。

## 3. 应用实例

### 3.1. 工程背景

金沙江下游梯级水电站送电多个省份，本文以某省为例，研究受端电网消纳省外电量的空间。根据官方数据，该电网火电装机容量为 6173 万 kW，占全省装机容量的 58.4%，另包括风电、太阳能、核电、水电等清洁能源，各类电源装机情况详见表 1。

**Table 1.** Installation of the receiving power grid in the end of 2021

**表 1.** 某受端电网 2021 年底装机情况表

电源类型	装机容量/万 kW	装机占比/%
火电	6173	58.4
水电	1278	12.1
核电	911	8.6
风电	364	3.4
太阳能	1842	17.4
总装机容量	10,568	/

数据来源：国家统计局。

### 3.2. 场景条件设置

根据受端电网某年实际运行负荷数据选取各月负荷峰谷差最大日为典型日，考虑事故备用容量后构建典型负荷过程，其中各月典型负荷过程如图 1 所示，考虑受端省份风光新能源季节性供电特征构建等效负荷过程。受端电网消纳空间分析过程中，以火电额定装机容量 600 MW 确定等效的火电机组数量。根据相关规定，火电备用容量宜取额定容量的 8%~15%，在消纳空间测算中取为额定容量的 12%，火电机组进行最高为 40%深度调峰。此外，由于清洁能源在电网中的占比不断提高，该受端电网火电年利用小时数逐渐稳定在 4000 h 左右。由于水电汛期调节能力差，枯水期具有较强的调节能力，在本研究计算中，根据相关研究[12]，受端电网水电汛期以直线出力方式运行，枯水期按照 2:1 的峰谷比运行，其中峰时段为 8:00~12:00，16:00~21:00。为确保核电安全稳定运行，核电在电网中以基荷满功率运行。

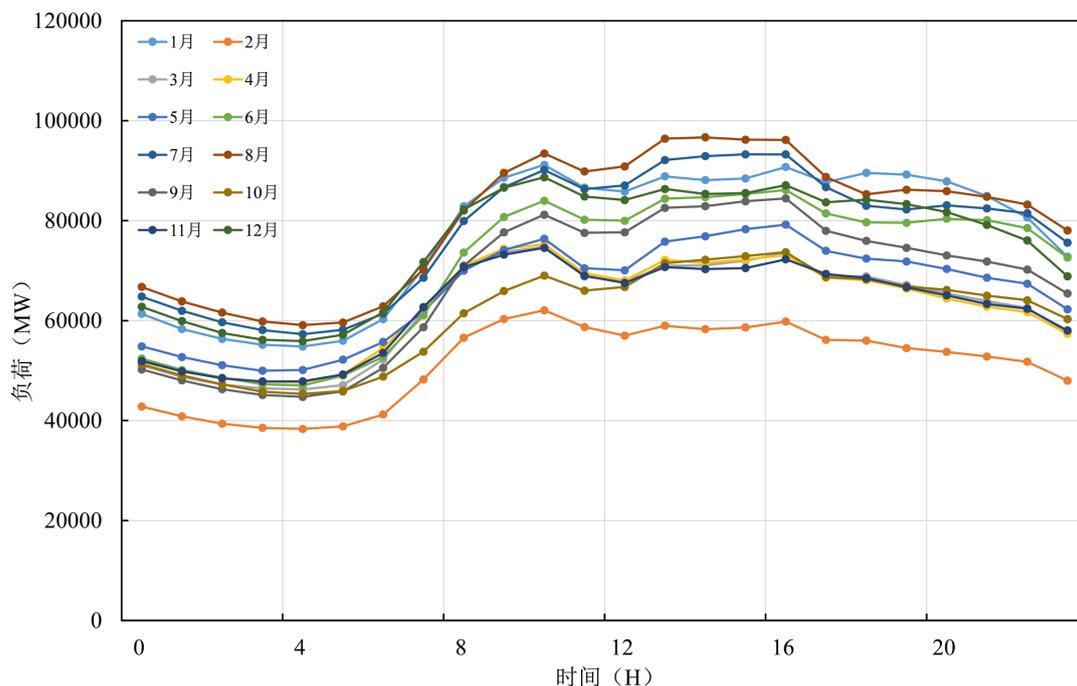
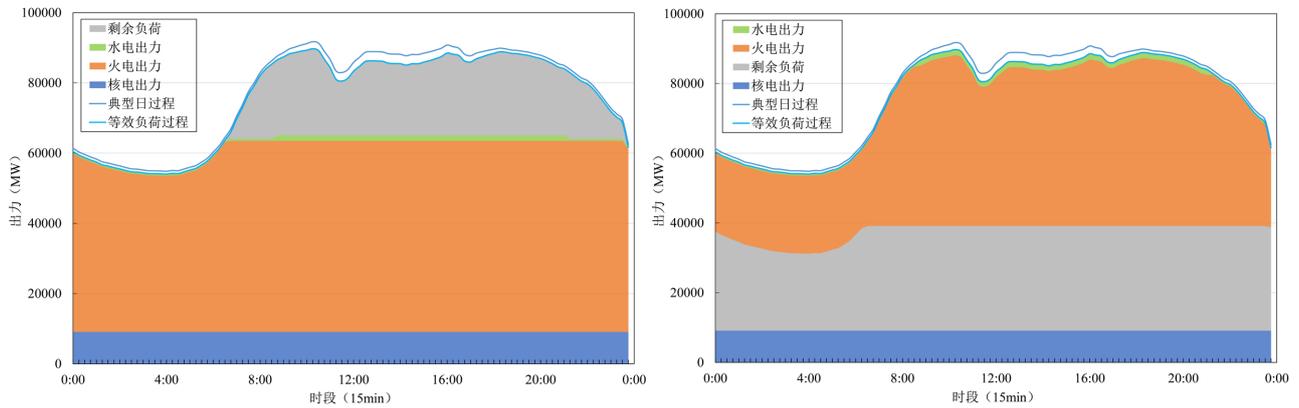


Figure 1. Typical daily load process diagram of the receiving power grid  
图 1. 受端电网各月典型日负荷过程图

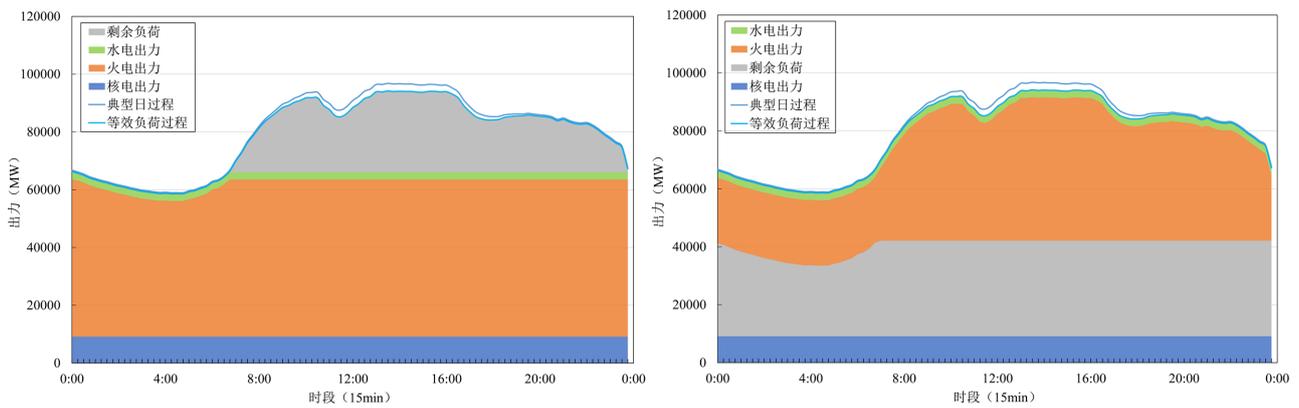
### 3.3. 计算结果分析

由图 2 中 1 月典型日电力电量平衡图可知, 1 月份接受省外输送电量最小时, 省内火电主要承担等效负荷低谷时段调峰, 但在高峰时段由于负荷过大, 即使在省内火电满发状态下仍不能满足省内负荷需求, 这表明该电网在 1 月典型日由于省内供电能力不足而在高峰时段产生电力电量缺口, 其中在 10:45 达到典型日最大电力缺口 24,642 MW。根据典型日电力电量平衡, 1 月份典型日最小需接受省外电量 3.25 亿 kW·h, 按照 31 天计算, 1 月受端电网的最小消纳空间为 100.8 亿 kW·h。1 月份接受省外输送电量最大时, 省内火电和水电承担等效负荷高峰时段调峰需求, 通过省内典型日在运机组深度调峰实现消纳省外电量最大化, 其中在 6:30~23:30 期间接受省外输送电力达到最高值 30,000 MW, 在 4:00 降至最小值 22,052 MW, 这表明受端电网 1 月接受省外输送电量最大时, 省外输电可在负荷高峰时段达到最大输送功率运行, 在低谷时段, 受端在运火电机组进行深度调峰, 省外输电功率有所降低以满足电力平衡。根据典型日电力电量平衡, 1 月份典型日最大可消纳省外电量 6.82 亿 kW·h, 1 月最大消纳空间为 211.7 亿 kW·h。

由图 2 中 8 月电力电量平衡图可知, 受端电网核电担任电网基荷运行, 省内水电由于汛期调节能力差, 在典型日以 2526 MW 全天等出力运行。在 8 月份最小消纳空间测算时, 考虑风光新能源后的等效负荷在低谷时段由受端火电进行调峰, 在高峰时段由于省内负荷高, 省内发电能力不足, 从 6:45~23:45 期间都存在不同程度的电力电量缺口, 在 13:30 达到最大值 28,140 MW。根据电力电量平衡结果, 8 月典型日最小需接受省外电量 3.47 亿 kW·h, 8 月份最小消纳空间为 107.5 亿 kW·h。在 8 月份最大消纳空间测算时, 等效负荷高峰时段根据电力电量平衡确定典型日火电机组运行状态, 其中在 7:00~23:45 期间省外输送电力达到当月省外最大输送能力 33,000 MW。在等效负荷低谷时段, 由于典型日在运火电机组无法进一步降低出力, 省外输送电力参与电网负荷变化调节, 因此在负荷低估时段省外输送电力减小, 在 4:15 达到最小值 24,379 MW。根据典型日电力电量平衡, 8 月典型日最大消纳省外电量为 7.52 亿 kW·h, 8 月电网省外电量最大消纳空间为 233.1 亿 kW·h。有关其他月份消纳空间测算结果详见表 2。



(1) 1月典型日电力电量平衡图



(2) 8月典型日电力电量平衡图

**Figure 2.** The minimum (left) and maximum (right) consumption space diagram of typical day in January and August**图 2.** 1 月和 8 月典型日最小(左)和最大(右)消纳空间计算结果图**Table 2.** The consumption space of receiving power grid**表 2.** 受端电网消纳空间计算结果表

月份	最小(亿 kW·h)	最大(亿 kW·h)	2021 年省外实际受电量(亿 kW·h)
1	100.8	211.7	111.2
2	0.0	129.6	62.3
3	15.0	171.1	95.3
4	15.4	167.6	88.3
5	28.1	196.5	102.2
6	64.7	196.6	119.1
7	92.6	232.1	155.8
8	107.5	233.1	144.5
9	48.4	171.0	123.5
10	8.2	187.0	111.7
11	13.7	176.6	106.3
12	83.9	206.9	119.0
合计	578.1	2279.6	1339.2

该受端电网以火电为主要发电电源，占比高达 58.4%，承担了省内主要调峰任务，新能源总体发电规模比较小，对电网调峰压力影响不大。此外，该受端电网省外购电量占比高，省外输电参与电网调峰，减小了电网调峰缺口，促进受端电网消纳省外电量。由图 1 受端电网各月典型负荷过程和表 2 受端电网消纳空间计算结果可得，该受端电网受气温影响在 1 月、6~8 月、12 月省内负荷高，消纳省外电量能力也较强，其中 8 月最大消纳空间达到全年最大 233.1 亿 kW·h，2 月受假期影响，省内负荷为全年最低水平，省内电源能够满足本省用电需求。总体来看，省内负荷变化与该受端电网消纳省外电量能力呈现一致性，在 2~8 月最大消纳空间逐渐增大，8~11 月逐渐降低，且 1 月和 12 月具有较大消纳空间。此外在省内负荷较高的 1 月、7 月、8 月、12 月，该受端电网对外省电量需求较其他月份有明显的增长，这表明该受端电网省外输电在负荷较高月份的电力电量平衡中起到重要支撑作用。

2021 年该省省外实受电量位于本文测算的消纳空间范围以内，且消纳空间变化趋势基本符合省外实受电量变化趋势。积极开展电力市场化交易促进受端电网有调节能力的水电、火电以及省外输电等参与电网调峰，将有助于提升受端电网省外电量消纳水平，发挥省外电量消纳潜力。

#### 4. 结论

本文针对金沙江下游梯级受端电网消纳空间问题，以受端电网典型日电力电量平衡为基础，提出了一种受端电网消纳空间测算思路，并建立混合整数线性规划模型进行求解。通过对金沙江下游梯级受端某电网进行消纳空间测算，得出如下结论：

- 1) 本文所提出的消纳空间测算方法可在较全面考虑受端电网运行情况的前提下，准确测算得到受端电网最小、最大消纳空间，测算得到的受端电网消纳空间符合实际用电情况。
- 2) 该受端电网在 1 月、6~8 月、12 月省内负荷高，消纳省外电量能力强，2 月省内负荷低，消纳省外电量能力为全年最低水平。除 2 月外，该电网其他各月均存在省内供电能力无法满足本省用电需求的情况。
- 3) 2021 年实际受电数据表明，该电网各月实受电量处于消纳空间中位值，积极引导受端电网有调节能力的水电、火电和省外输电参与电网调峰将有助于提升受端电网省外电量消纳能力。

#### 基金项目

中国长江电力股份有限公司科技项目(Z242202001)，国家自然科学基金项目(52079014)。

#### 参考文献

- [1] 任红, 谢泽, 王旭辉. 建设金沙江清洁能源基地对实现“双碳”目标作用重大[J]. 中国三峡, 2021(9): 20-28+2. REN Hong, XIE Ze and WANG Xuhui. The construction of the Jinsha River clean energy base plays a great role in achieving the “dual carbon” goal. China Three Gorges, 2021(9): 20-28+2. (in Chinese)
- [2] 程春田, 武新宇, 申建建等. 亿千瓦级时代中国水电调度问题及其进展[J]. 水利学报, 2019, 50(01): 112-123. CHENG Chuntian, WU Xinyu, SHEN Jianjian, et al. A state-of-the-art review of China's hydropower operations and the recent advances in the era of gigawatts. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 112-123. (in Chinese)
- [3] 程春田, 励刚, 程雄, 等. 大规模特高压直流水电消纳问题及应用实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 549-560. CHENG Chuntian, LI Gang, CHENG Xiong, et al. Large-scale ultra high voltage direct current hydropower absorption and its experiences. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 35(3): 549-560. (in Chinese)
- [4] 陈宇晨, 胡晓勇, 黄日福, 等. 三峡大水电交易策略技术工作体系研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(4): 362-370. CHEN Yuchen, HU Xiaoyong, HUANG Rifu, et al. Research on technical working system of Three Gorges large hydropower trading strategy. Journal of Water Resources Research, 2021, 10(4): 362-370. (in Chinese)
- [5] 钟儒鸿, 程春田, 廖胜利, 等. 兼顾多电网调峰与水电消纳的跨流域梯级水电站调度方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 114-122. ZHONG Ruhong, CHENG Chuntian, LIAO Shengli, et al. Inter-basin scheduling method of cascaded hydropower plants considering multi-grid peak shaving and hydropower accommodation. Automation of Electric Power System, 2021, 45(14): 114-122.

---

(in Chinese)

- [6] 杨瑾诚, 邓长虹, 龙志君, 等. 基于风电消纳的梯级水电实时调度策略及其评价方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 330-338.  
YANG Jincheng, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. Real-time dispatching strategy of cascade hydropower based on wind power generation and its evaluation method. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2020, 53(4): 330-338. (in Chinese)
- [7] 申建建, 程春田, 曹瑞, 等. 大规模水电消纳和调峰调度关键问题及研究进展[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 174-183.  
SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, CAO Rui, et al. Key issues and development in large-scale hydropower absorption and peak regulation. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(11): 174-183. (in Chinese)
- [8] 谭政宇, 陈仕军, 刘德旭, 等. 基于火电分级调峰深度的西南水电跨省消纳空间分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 103-109.  
TAN Zhengyu, CHEN Shijun, LIU Dexu, et al. Analysis of inter-provincial consumption space of southwest hydropowerbased on thermal power classification peak shaving depth. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(2): 103-109. (in Chinese)
- [9] 卢鹏, 周建中, 莫莉, 等. 梯级水电站群多电网调峰调度及电力跨省区协调分配方法[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2721-2728.  
LU Peng, ZHOU Jianzhong, MO Li, et al. Method of peak operation and electric power inter-provincial coordinated distribution for cascade hydropower plants among multiple power grids. *Power System Technology*, 2016, 40(9): 2721-2728. (in Chinese)
- [10] SKJELBRED, H. I., KONG, J. and FOSSO, O. B. Dynamic incorporation of nonlinearity into MILP formulation for short-term hydro scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 209: 112628.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105530>
- [11] LI, X., LI, T. J., WEI, J. H., et al. Hydro unit commitment via mixed integer linear programming: A case study of the Three Gorges Project, China. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1232-1341.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2288933>
- [12] 王永强. 厂网协调模式下流域梯级电站群短期联合优化调度研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
WANG Yongqiang. Stations short-term optimal operation under the coordination on power plants and power grid. Doctoral Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)