

# 高海拔地区水风光出力特性研究

谢奥 刘杨 李尚哲 吴红梅\*

(西藏农牧大学 清洁能源与电气工程学院, 西藏林芝 860000)

**摘要** 为揭示高海拔地区水电、风电、光伏(以下简称“水风光”)的出力规律,本文首先分析高海拔环境对水风光出力的影响机理,进而构建纳入高海拔修正的出力计算模型;以青海玉树高海拔地区为算例,基于当地气象与水文数据,通过MATLAB实现水风光出力模拟,并绘制出力特性曲线;最后分析高海拔水风光出力的特殊性:风电因空气密度降低导致出力下降,光伏因高辐照度与低温协同作用使出力效率提升,水电受季节性积雪融水影响呈现夏丰冬枯特征。研究结果可为高海拔地区水风光互补电站规划与调度提供理论支撑。

**关键词** 高海拔; 水风光互补; 出力特性; 空气密度

中图分类号: TM61

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2026) 04-0528-06

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2026.04.013

## Research on the Output Characteristics of Water, Wind and Solar Energy in High Altitude Areas

XIE Ao, LIU Yang, LI Shangzhe, WU Hongmei\*

(School of Clean Energy and Electrical Engineering, Xizang Agricultural & Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China)

**Abstract:** To reveal the power generation patterns of hydropower, wind power, and photovoltaic (hereinafter referred to as "hydro-wind-solar") in high-altitude regions, this study first analyzes the mechanisms by which high-altitude environments affect hydro-wind-solar output, then establishes a power generation calculation model incorporating high-altitude corrections. Taking the high-altitude area of Yushu, Qinghai Province, as a case study, the research simulates hydro-wind-solar output using local meteorological and hydrological data through MATLAB, and plots the corresponding power characteristic curves. Finally, it examines the unique characteristics of hydro-wind-solar output at high altitudes: wind power decreases due to reduced air density, photovoltaic efficiency increases due to the combined effects of high solar irradiance and low temperatures, and hydropower exhibits seasonal variations with abundant output in summer and low output in winter, influenced by snowmelt. The findings provide theoretical support for the planning and operation of hybrid hydro-wind-solar power stations in high-altitude regions.

**Key words:** High altitude; Water and scenery complement each other; Output characteristics; Air density

收稿日期: 2025-09-23

作者简介: 谢奥 (2001-), 男, 汉族, 贵州毕节人, 硕士生。研究方向: 从事新能源并网与控制技术研究。

通信作者: 吴红梅 (1977-), 女, 汉族, 辽宁大连人, 副教授。研究方向: 从事微电网稳定运行及控制研究工作。

基金项目: 西藏自治区自然科学基金项目 (适用于水风光储综合能源系统高效利用的多端口电力电子变压器关键技术研究 XZ202501ZR0017)。

新能源的大力发展是我国实现“双碳”目标的关键举措之一<sup>[1,2]</sup>。预计到2030年底,新能源装机容量将达到12 TW的远景目标<sup>[3]</sup>。中国西部高海拔地区拥有极其丰富的水电、风电、光伏资源——该区域年太阳辐照度普遍超过1 600 kWh/m<sup>2</sup>,年均风速可达4~6 m/s,且河流径流稳定、地势落差显著,是我国建设大型清洁能源基地的核心区域。西藏水电资源尤其是藏东南水电能源基地,汇聚了雅鲁藏布江、怒江、金沙江等著名河流,蕴藏着丰富的水能资源,是我国重要的战略储备资源<sup>[4]</sup>。

然而,高海拔环境的特殊性对水风光出力特性产生显著影响,现有基于低海拔环境建立的出力计算模型难以精准适配该区域需求。高海拔地区的低空气密度(海拔4 000 m以上地区空气密度较标准大气压下降30%~40%)会直接削弱风轮捕获的风能,导致风电出力下降<sup>[5]</sup>;高太阳辐照度(因大气透明度高,年辐照量较平原地区高15%~25%)与低温环境(年均气温低于5℃)协同作用,可抑制光伏组件的温度损耗,提升光电转换效率<sup>[6]</sup>;同时,季节性积雪融水主导的水文过程,使水电出力呈现“夏季丰沛、冬季枯少”的强季节性特征<sup>[7]</sup>。

本文以高海拔地区水风光出力规律揭示为核心目标,开展以下研究工作:首先,系统分析高海拔环境对水风光出力的影响机理,明确关键影响因子与量化关系;其次,基于机理分析构建纳入高海拔修正的水风光出力计算模型,弥补传统模型在高海拔场景下的精度缺陷;再次,以某高海拔地区为算例,基于当地气象(风速、辐照度、温度)与水文(径流量)数据,通过MATLAB平台实现水风光出力的全年时序模拟,并绘制出力特性曲线;最后,量化分析高海拔水风光出力的特殊性,验证修正模型的有效性。

## 1 高海拔对水风光出力的影响机理

### 1.1 对风电的影响机理

标准大气压下空气密度约为1.225 kg/m<sup>3</sup>,而高海拔地区因大气压力降低<sup>[8]</sup>,空气密度呈指数级衰减:海拔每升高1 000 m,空气密度约下降8%~10%;当海拔4 000 m时,空气密度降至0.90~0.98 kg/m<sup>3</sup>,较海平面降低20%~26%<sup>[9,10]</sup>。这种密度衰减直接导致风轮单位时间内捕获的气流质量减少,进而削弱风能输入。根据公式 $E_{wind}=0.5\rho AV^3$ ,低风速阶段(切入风速~额定风速):出力与风速三次方、空气密度均呈正相关,密度降低会叠加风速的影响,导致出力衰减幅度大于密度衰减幅度;额定风速以上阶段:风机虽进入恒功率运行,但高海拔低密度气流对风轮的推力减小,风机需通过调整桨距角维持额定功率,实际出力仍会较低海拔场景下降5%~8%,叠加低风速阶段的衰减,最终导致全年风电出力平均下降15%~20%;低空气密度还会影响风机的散热效率(空气导热系数随密度降低而下降),导致风机发电机、变流器等核心部件散热能力减弱,在高负荷运行时易触发过热保护,进一步限制出力持续时间;同时,低密度气流的湍流强度相对较高,可能增加风轮载荷波动,间接降低风机运行稳定性。

### 1.2 对光伏的影响机理

高海拔地区因大气稀薄,对太阳辐射的削弱作用显著降低,西藏地域辽阔,辐射量是内地的8倍<sup>[11]</sup>;大气散射与吸收减少:高海拔地区水汽、气溶胶含量低,太阳直射辐照占比提升至70%~80%(低海拔地区约为50%~60%),年太阳辐照量可达1 600 kWh/m<sup>2</sup>,较平原地区高15%~25%;高海拔地区紫外辐射(200~400 nm)强度是低海拔的1.5~2.0倍,部分高效光伏组件对紫外光谱的响应效率较高,可进一步提升光电转换增益<sup>[12,13]</sup>。

光伏组件的光电转换效率具有负温度系数（多数晶硅组件温度系数为 $-0.35\% \sim -0.45\% / ^\circ\text{C}$ ），即温度升高会导致载流子复合速率加快、开路电压下降，进而降低效率<sup>[14]</sup>。高海拔地区年均气温多低于 $5^\circ\text{C}$ ，夏季最高气温不超过 $20^\circ\text{C}$ ，组件工作温度长期维持在 $15^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ （低海拔夏季组件温度常达 $50^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ ），具体影响包括：低温环境下半导体晶格振动减弱，载流子在电极收集前的复合概率降低，开路电压可提升 $5\% \sim 10\%$ ；以温度系数 $-0.4\% / ^\circ\text{C}$ 为例，若高海拔组件平均温度较低海拔低 $15^\circ\text{C}$ ，则效率可提升 $6\% \sim 8\%$ ，叠加高辐照度的增益，最终实现光伏的出力效率提升<sup>[15]</sup>。

### 1.3 对水电的影响机理

目前内陆地区的水能资源基本已经开采完毕，开发工作逐渐向西藏地区延伸。但是西藏地区具有海拔高、温度低、气压低等特点<sup>[16]</sup>。水电出力依赖河流径流的水量与水头，高海拔地区因冬季低温导致降水以积雪形式储存，形成“积雪累积-春季消融-夏季丰水-冬季枯水”的水文循环特征，直接决定水电出力的季节性规律，具体机理如下：高海拔地区冬季气温低于 $-5^\circ\text{C}$ ，降水 $90\%$ 以上以固态雪形式累积，形成厚度 $0.5 \sim 2.0\text{ m}$ 的积雪层，相当于“天然水库”的储水过程；春季气温回升至 $0^\circ\text{C}$ 以上，积雪开始消融，融水沿坡面汇入河流，形成“春汛”；夏季气温进一步升高，高山冰川开始消融，叠加夏季降雨，形成全年最大径流峰值；秋季气温下降，消融减弱，径流逐渐回落；冬季积雪停止消融，径流仅依赖地下水补给，降至全年最低<sup>[17,18]</sup>。

$$\text{水电出力公式为: } P_{\text{hy, std}} = 9.81 \times Q \times H \times \eta \quad (1)$$

其中 $Q$ 为流量， $H$ 为水头， $\eta$ 为机组效率，在水头相对稳定的前提下，流量 $Q$ 的季节性变化直接决定出力：丰水期：积雪+冰川融水+降雨共同作用，河流流量达到额定值的 $1.2 \sim 1.5$ 倍，水电出力可满发甚至超发；枯水期：仅靠地下水补给，流量降至额定值的 $20\% \sim 30\%$ ，水电出力被迫降至最大容量的 $20\% \sim 30\%$ ，形成“夏丰冬枯”的典型特征。

### 1.4 高海拔对水风光出力影响机理总结

高海拔环境对水风光出力的影响机理呈现显著差异化：

风电：受低空气密度单一负向因素主导，表现为出力普遍性衰减；

光伏：受高辐照度、低温双重正向因素协同作用，表现为效率提升；

水电：受季节性积雪融水的水文调节作用，表现为“夏丰冬枯”的周期性波动。

## 2 高海拔修正出力计算模型

### 2.1 风电出力计算模型

风电出力与空气密度呈正相关，高海拔低气压导致空气密度降低，直接减少风机捕获的风能，需通过空气密度修正量化该影响。

标准海拔（ $\leq 1\,000\text{ m}$ ）、标准气象条件（气压 $101.325\text{ kPa}$ 、温度 $20^\circ\text{C}$ ）下，风机出力按风速区间分段计算：

$$P_{\text{wind, std}} = \begin{cases} 0 & v < v_i \text{ 或 } v > v_o \\ \frac{P_r}{v_r^3 - v_i^3} (v^3 - v_i^3) & v_i \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_o \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $P_{wind, std}$  为标准条件下的风电出力;  $v_i$ 、 $v_o$ 、 $v_r$  为风机切入、切出、额定风速;  $P_r$  为风机的额定出力。

### 2.1.1 高海拔空气修正

$$\text{高海拔气压计算: } P_h = 101.325 \times \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15}\right)^{5.256} \quad (3)$$

其中  $H$  为海拔。

$$\text{高海拔空气密度计算: } \rho_h = \frac{P_h \times 28.97}{8.314 \times T} \quad (4)$$

其中  $T$  为环境温度; 28.97 为干空气摩尔质量; 8.314 为理想气体常数。

空气密度修正系数: 定义高海拔空气密度与标准空气密度 ( $\rho_{std} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ) 的比值为修正系数:

$$K_\rho = \frac{\rho_h}{\rho_{std}} \quad (5)$$

### 2.1.2 修正后模型

$$\text{综上所述, 修正后的风电出力计算模型为: } P_{wind, h} = K_\rho \times P_{wind, std} \quad (6)$$

## 2.2 光伏出力计算模型

光伏出力受辐照度 (正相关) 与组件温度 (负相关) 共同影响, 高海拔地区强太阳辐射 (辐照度提升 15% ~ 25%) 与低温环境 (组件温度降低 8 ~ 15 °C) 形成协同效应, 需通过双因素修正提升出力计算精度。

标准测试条件 (辐照度  $G_{std} = 1000 \text{ W/m}^2$ 、组件温度  $T_{std} = 25 \text{ °C}$ ) 下, 光伏组件出力公式为:

$$P_{pv, std} = P_{sc} \times \frac{G}{G_{std}} \times [1 + K_T \times (T_{c, std} - T_{std})] \quad (7)$$

其中  $P_{pv, std}$  为标准条件下光伏出力;  $P_{sc}$  为组件标准测试功率;  $G$  为实时辐射照度;  $K_T$  为组件温度系数;  $T_{c, std}$  为标准条件下组件温度。

辐射照度修正: 量化高海拔强辐射影响, 定义实际辐照度  $G_h$  与标准辐照度的比值:

$$K_G = \frac{G_h}{G_{std}} \quad (8)$$

组件温度修正: 高海拔低温降低组件工作温度, 基于环境温度  $T_{a, h}$  推导修正后组件温度  $T_{c, h}$ :

$$T_{c, h} = T_{a, h} + \frac{G_h}{800} \times (T_{c, std} - T_{std}) \quad (9)$$

其中 800 为辐照度影响系数。

$$\text{温度修正系数: } K_{T, h} = 1 + K_T \times (T_{c, h} - T_{std}) \quad (10)$$

$$\text{综上所述, 修正后的光伏出力计算模型为: } P_{pv, h} = P_{sc} \times K_G \times K_{T, h} \quad (11)$$

## 2.3 水电出力计算模型

高海拔水电径流受季节性积雪融水主导, 需通过积雪融水模块修正基础径流, 进而计算出力, 核心是量化融水对总径流的贡献。

不考虑积雪融水时, 水电出力由基础径流  $Q_{std}$ 、净水头  $H$  和机组效率  $\eta$  决定:

$$P_{hy, std} = 9.81 \times Q_{std} \times H \times \eta \quad (12)$$

高海拔积雪融雪修正: 采用“度日模型”计算积雪融水径流量  $Q_{snow}$ , 修正后总径流  $Q_h$  为:

$$Q_{snow} = \frac{K_d \times (T_{a, h} - T_0) \times A_{snow} \times 10^3}{86400} \quad (13)$$

$$Q_h=Q_{std}+Q_{snow}-E \tag{14}$$

其中  $K_d$  为度日系数，高海拔地区取 0.8 - 1.2； $T_0$  为积雪融水临界温度； $A_{snow}$  积雪覆盖面积； $E$  为蒸发量，高海拔地区取基础径流的 5% ~ 8%。

综上所述，修正后的水电出力计算模型为： $P_{hy,h}=9.81\times Q_h\times H\times \eta \tag{15}$

3 算例分析

3.1 数据来源

以北纬 33.01°，东经 97.01°，海拔 4 200 m 为研究区域，基于 2021 年气象数据、水文数据，通过 MATLAB 实现水风光出力模拟，验证模型有效性。基础数据见表 1：

表 1 该地区基础数据  
Tab.1 The basic data of this region

| 数据类型 | 核心参数   | 数值范围/取值                                                    |
|------|--------|------------------------------------------------------------|
| 气象数据 | 环境温度   | -15 ℃ ~ 18 ℃                                               |
|      | 气压     | 58 kPa ~ 62 kPa                                            |
|      | 辐照度    | 350 W/m <sup>2</sup> ~ 1 100 W/m <sup>2</sup>              |
|      | 风速     | 2.5 m/s ~ 6.8 m/s                                          |
| 水文数据 | 基础径流   | 15 m <sup>3</sup> /s ~ 30 m <sup>3</sup> /s                |
|      | 积雪覆盖面积 | 0 ~ 800 km <sup>2</sup>                                    |
| 设备参数 | 风机     | $v_t=3\text{ m/s}$ $v_r=12\text{ m/s}$ $v_o=25\text{ m/s}$ |
|      | 光伏组件   | $P_{stc}=300\text{ W}$ $K_T=-0.4\text{ \%}/\text{℃}$       |
|      | 水电站    | $H=80\text{ m}$ $\eta=0.88$                                |

3.2 仿真分析

将修正后的水风光出力模型引入，借助 MATLAB R2023b 工具求解。该区水风光出力特性见图 1。

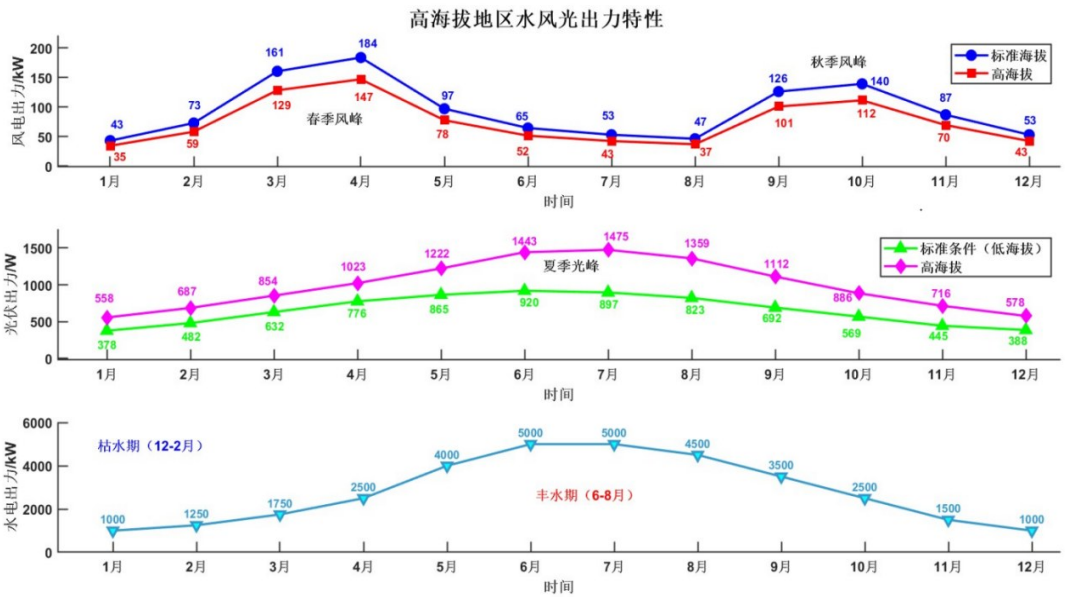


图 1 标准条件与高海拔水风光出力对比图

Fig.1 Comparison chart of hydropower, wind power and photovoltaic output

从图1中可以得出以下结论：

- (1) 高海拔地区风电出力相较标准条件下的风电出力有所下降，本文算例风电发电平均下降16.5%；
- (2) 高海拔地区光伏出力相较标准条件下的光伏出力有所提升，本文算例光伏发电平均提升34%；
- (3) 高海拔地区水电出力特性与标准条件下的水电出力特性差别较小，且均呈现夏季丰水冬季枯水特征。

## 4 结论与展望

本文围绕高海拔地区水风光出力规律展开研究，通过机理分析、模型构建与算例验证，明确了高海拔环境对水风光出力的差异化影响特征。揭示了高海拔环境对水风光出力的核心影响机理，并建立了高海拔修正模型，可精准量化出力特性。

量化的出力规律与修正模型，可服务于高海拔地区水风光互补电站的规划与调度：在容量配置阶段，可依据风电出力衰减率、光伏效率提升率优化风光装机比例；在调度策略制定阶段，可结合水电“夏丰冬枯”的季节性特征，利用风光出力与水电径流的时空互补，平抑系统出力波动，提升清洁能源消纳水平。

本文虽明确了高海拔水风光的基础出力规律，但仍存在进一步深化与拓展的空间，未来可从以下方向开展研究：首先进行精细化模型的构建与多因素耦合分析，其次是进行水风光互补系统的生命周期优化，再次是通过跨区域实证研究与标准体系完善，最后是进行极端气候场景下的风险防控研究。

### 参考文献：

- [1] 申建建,王月,程春田,等.水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(11):3871-3884.
- [2] 黄显峰,鲜于虎成,许昌,等.考虑短期互补的水风光发电系统中长期优化调度[J].水力发电学报,2022,41(11):68-78.
- [3] 李曦.国家发展改革委等九部门:印发《“十四五”可再生能源发展规划》[J].中国设备工程,2022(13):1-1.
- [4] 卫魏,罗红英,余权威,等.西藏水电能源开发问题分析[J].高原农业,2021,5(03):301-308.
- [5] 黄玉诚,王瑜敏.高海拔对矿井轴流式风机性能影响及风机合理选型[J].中国矿业,2020,29(1):133-136.
- [6] 吕玉坤,赵润一,周庆文,等.环境因素对光伏组件的温度及输出特性影响研究[J].太阳能学报,2024,45(11):194-203.
- [7] 冯君园,蔡强国,李朝霞,等.高海拔寒区融水侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2015,22(3):331-335.
- [8] 赵斌,马海鹏,赵元星,等.高原地区垂直轴风力机应用分析[J].排灌机械工程学报,2018,36(3):250-256.
- [9] 朱育毕(文/图).高海拔风电场的微气象特征与发电效率[J].能源新观察,2025(7):37-39.
- [10] 朱东杰,吕昆桦,宋长虹,等.基于密度修正的风电功率曲线线性拟合模型[J].综合智慧能源,2025,47(3):84-91.
- [11] 贾明雨,熊丽,谢珠旦增,等.基于神经网络的离网自适应光储一体化发电系统[J].高原农业,2023,7(05):560-566.
- [12] 段美霞,高妙妮,姜涵,等.1961-2021年青海省风光水气候要素和资源时空变化特征[J].高原气象,2024,43(6):1614-1629.
- [13] 黄盼,赵伟,李爱农,等.川西山区太阳辐射估算及其时空分布特征[J].山地学报,2017,35(3):420-428.
- [14] 朱静燕,邹帅,孙华,等.环境温度下晶硅光伏组件的直冷背板散热分析[J].物理学报,2021,70(9):409-416.
- [15] 马玉岭.西藏高原地区光伏配套储能系统设计与运行研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(4):072-075.
- [16] 齐腾岳,贾蒲云,罗红英,等.高海拔地区混流式水轮机模型的效率试验分析[J].高原农业,2022,6(04):387-393.
- [17] 吴寒雨,董晓华,董立俊,等.气候变化下雅砻江流域降水时空变化特征研究[J].中国农村水利水电,2022(4):8-16+24.
- [18] 鲁帆,杨姗姗,严登华,等.气候-水文变化对水力发电的影响预估综述[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(4):331-340.