

生态红线约束下甘孜水风光储多目标调度与空间优化

甘斯琦¹ 周思睿¹ 周牧云¹ 李建武¹ 万琴琴^{1*} 刘星宇²

1. 四川民族学院数理与统计学院, 中国·四川 康定 626001

2. 四川民族学院智能科学与技术学院, 中国·四川 康定 626001

摘要: 高原风光出力波动与全域生态红线管控存在空间冲突, 现有多能互补模型缺少生态刚性约束适配方案。以甘孜州为研究载体, 基于 30m 遥感栅格扣除各类禁建区域, 量化水风光生态约束下可开发规模; 构建日间光储、夜间风水 24h 双尺度协同调度框架; 耦合 GIS 空间图层与 NSGA-II 算法, 将生态红线转化 0-1 选址约束, 建立源-储-网多目标优化模型; 采用 AHP-熵权组合赋权 TOPSIS 法完成三维效益评估。测算得到区域水能、光伏、风能技术可开发量分别为 46320、54550、3300MW; 优化后系统出力波动率由 45.2% 降至 26.3%, 弃电率由 18.7% 降至 0.4%, 年均碳减排 1415.26 万吨, 项目全生命周期收益率 8.7%。该成套量化框架可为西南高原清洁能源基地规划、储能站点布局提供数据支撑, 模型可复制应用至青藏高原同类生态敏感区域。

关键词: 碳中和; 水风光储; 生态红线; NSGA-II; 空间优化

Ecological Red Line Constraints on Multi-Objective Scheduling and Spatial Optimization of Hydro-Wind-Solar-Storage in Ganzi Prefecture

Gan Siqu¹, Zhou Sirui¹, Zhou Muyun¹, Li Jianwu¹, Wan Qinqin^{1*}, Liu Xingyu²

1. School of Mathematics, Physics and Statistics, Sichuan Minzu College, China Sichuan Kangding 626001

2. School of Intelligent Science and Technology, Sichuan Minzu College, China Sichuan Kangding 626001

Abstract: Volatile power output of plateau renewable energy creates spatial conflicts with comprehensive ecological redline control, and existing multi-energy complementary models lack matching schemes for rigid ecological constraints. Taking Garzê Prefecture as the research area, this study adopts 30 m remote sensing grids to deduct various construction-prohibited regions and quantify ecologically constrained exploitable scales of hydropower, photovoltaic and wind power. A 24-hour dual-timescale collaborative scheduling framework is built for daytime solar-storage and nighttime wind-hydro operation. Integrating GIS layers and NSGA-II algorithm, ecological redlines are transformed into 0-1 siting constraints to construct a source-storage-grid multi-objective optimization model. The AHP-entropy combined weighting TOPSIS method is utilized for three-dimensional benefit evaluation. The technically exploitable capacities of hydropower, PV and wind power are 46,320 MW, 54,550 MW and 3,300 MW. After optimization, output volatility drops from 45.2% to 26.3%, curtailment rate falls from 18.7% to 0.4%. The system realizes annual carbon emission reduction of 14.1526 million tons, with a full-life-cycle return rate of 8.7%. This quantitative framework provides data support for clean energy base and energy storage layout planning on the Southwest Plateau, and the model can be replicated for similar ecologically sensitive areas on the Qinghai-Xizang Plateau.

Keywords: Carbon neutrality; Hydro-wind-solar-storage; Ecological red line; NSGA-II; Spatial optimization

1 研究背景与问题提出

“双碳”战略及“十五五”能源发展规划明确西南高原水风光一体化开发定位, 要求同步推进新能源消纳提升与全域生态空间管控。

甘孜水风光资源富集, 但风光出力具备强间歇性, 叠加大面积生态红线、本地负荷有限、外送通道容量约束, 电网运行矛盾突出, 存在风光预测精度不足、源储荷时序匹配度低、一体化协同调度机制缺失等问题。

1.1 国内外研究综述

(1) 梯级水电调度模型仅适配平原流域, 未设置高原生态刚性约束, 仅采用单日单尺度调度^[1];

(2) 储能协同优化仅开展时序仿真, 未兼顾能源开发与生态敏感区空间冲突;

(3) 资源优化将智能算法、GIS 选址工具割裂, 难以实现源储网同步优化^[2]。

现有研究统一短板: 缺乏兼顾日内、季节双尺度, 同

时嵌入生态红线空间约束的高原一体化调度－布局框架。

1.2 研究意义与创新点

理论意义：构建“遥感资源核算－双尺度调度－GIS－NSGA II 耦合－多维效益评价”完整量化体系，补齐高原生态敏感区多能互补成套研究方法。

实践意义：测算结果可为甘孜“十五五”清洁能源、抽蓄站点规划提供量化依据，整套模型可推广至青藏高原同类区域。

本文创新如下：一是针对现有单尺度调度局限，搭建日间光储、夜间风水 24h 调控框架，同步平抑日内、季节风光出力波动；二是突破算法、GIS 相互割裂的研究缺陷，生态红线设 0-1 刚性约束，同步求解装机容量、储能场址；三是建立经济－环境－安全三维指标体系，采用 AHP-熵权 TOPSIS 构建高原专属效益评估模型。

1.3 研究内容与技术路线

对多源基础数据开展预处理，叠加空间管控图层层级测算水风光资源可开发规模；划分四类气象径流典型场景，构建分时协同调度体系；引入生态刚性约束，耦合 GIS 与 NSGA-II 算法实现源储网空间多目标优化；采用组合赋权法开展多方案效益评估，确定最优系统配置与调控方案。技术路线依次为多源数据预处理、遥感资源潜力栅格核算、多场景调度建模、MATLAB 多目标仿真、GIS 开发适宜性分区、TOPSIS 综合效益评估，最终形成研究结论与优化对策。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

甘孜州 46.47% 国土纳入生态保护红线管控范围，联合永久基本农田、城镇开发边界与各级自然保护区，形成可再生能源开发刚性空间约束，能源布局应避让生态敏感斑块及地质灾害高风险区域。区域水能、太阳能、风能资源富集，资源时空分布具备互补潜力，是四川省重要清洁能源基地。复杂山地地形与严格生态管控压缩了能源可开发空间，需在严守生态底线前提下开展资源潜力评价与布局优化。

2.2 数据来源与预处理

本研究集成管控边界矢量、DEM 地形、气象观测、

水文径流多源数据集。原始数据完成坐标系统一、研究区掩膜裁剪、时序异常值剔除、栅格重采样等标准化处理；借助 ArcGIS 开展多因子叠加、栅格运算等空间分析，构建复合约束图层，为资源潜力测算、适宜性分区、系统仿真与优化建模提供数据支撑。

3 甘孜州水－光－风资源普查与潜力量化

3.1 水能资源分布与潜力

甘孜州水能资源理论蕴藏量超 50000MW，占四川省总储量 29%，技术可开发量 46320MW，居全省前列。资源高度集聚于金沙江、雅砻江、大渡河三大流域，干支流水量充沛、天然落差大，已建成两河口、长坝、猴子岩等大型水电站，县域中小型水电形成补充支撑格局。

3.2 太阳能资源分布与潜力

甘孜州为全国太阳能一级富集区，高海拔区域年日照时数可达 2400~2600h，年太阳辐射量 6000MJ/m² 以上。太阳能理论蕴藏量超 120000MW，生态与地形约束后技术可开发量 54550MW，居四川省首位。空间呈现南部优于北部、高海拔优于河谷分布特征，理塘、巴塘、乡城、稻城为光伏优先开发区，当前光伏装机保持高速增长。

3.3 风能资源分布与潜力

甘孜州风能技术可开发量 3300MW，主要分布于安宁河谷、雅砻江河谷及高原台地。风速年内冬春季偏高，与夏秋季丰水期水电形成良好季节互补，目前整体处于前期测风与规划布局阶段，具备规模化协同开发潜力。

3.4 多能资源互补特性分析

日内互补：光伏日间发电，风电弥补夜间出力缺口，水电持续可调平抑短时波动；

季节互补：丰水期水电为主力，枯水期风光提升出力填补供电缺口；

空间互补：水电沿干流分布，风光集中高原台地，便于储能集中配套^[9]。

3.5 开发约束识别与资源潜力量化分区

以全域国土空间管控底线为基础开展水风光资源潜力定量测算（见表 1），选取三类空间管控边界作为刚性限制条件，叠加地形坡度、地质灾害风险构建复合空间限制图层；依托 ArcGIS 栅格叠加工具识别禁建单元，量化核算

表1 生态约束下甘孜清洁能源技术可开发规模单位：MW

能源类型	理论蕴藏量/MW	技术可开发量/MW	省内排名	主要分布区域
水能	>50000	46320	2	金沙江、雅砻江、大渡河流域
太阳能	>120000	54550	1	理塘、巴塘、乡城、稻城、甘孜等高原县
风能	约35000	3300	—	安宁河谷、雅砻江河谷、甘孜县城周边

注：技术可开发量为剔除各类空间管控限制区域后得到的可开发装机规模。

各类资源生态约束下技术可开发规模。综合资源禀赋水平、管控限制强度与工程落地条件，完成全域优先、适宜、储备三级开发分区划定。

4 多能互补储能系统协同模式构建

4.1 模式设计原则与总体思路

针对水、光、风单电源出力波动大、消纳难度高等问题，以抽水蓄能为主要调节手段，遵循资源互补、源储协同、高效利用、生态优先原则，构建光储与风水协同运行模式，统筹低碳减排、电网安全、经济效益与生态保护目标。

4.2 双协同调度模式与多场景策略

构建日间光储协同、夜间风水协同的 24h 不间断调度机制：日间以光伏为核心，富余电量驱动储能充电；夜间及弱光时段以风电、水电为主体，储能参与调峰填谷。结合甘孜州径流与气候特征，划分丰水期晴天大风、枯水期阴天小风、平水期晴天小风、平水期阴天大风四类典型场景，制定储能充放电与外送联动策略，实现富余储能、缺额释能、波动平抑的精细化调控（见表 2）^[6-7]。

系统功率平衡约束：

$$P_{h,t} + P_{pv,t} + P_{w,t} + P_{dis,t} = P_{load,t} + P_{ch,t} + P_{out,t},$$

式中 $P_{hydro,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 、 $P_{wind,t}$ 为 t 时刻水电、光伏、风电出力； $P_{ch,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 为储能充、放电功率。

抽蓄荷电状态约束：

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \frac{P_{ch,t}\eta_{ch}\Delta t}{E_{max}} - \frac{P_{dis,t}\Delta t}{\eta_{dis}E_{max}}, SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max},$$

式中： SOC_t 为 t 时刻库容荷电状态， η_{ch} 、 η_{dis} 为充、放电效率。

四类场景依据径流、光照、风速组合划分，分别对应储能满充、满放、动态平抑等调控策略，为时序仿真提供边界条件。

5 多能互补系统 MATLAB 建模与仿真

5.1 模型假设

（1）水、风、光出力相互独立，不计气象耦合效应；

（2）抽蓄综合效率 75%~80%，忽略水头波动、机组瞬时损耗；

（3）生态红线、地质高风险区装机容量强制置 0；

（4）负荷、外送通道采用恒定典型时序。

5.2 模型与研究方法

优化目标包含年化综合成本最小、年碳减排量最大、系统出力波动率最小：

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{8760} (C_{inv} + C_{op} + C_{trans}),$$

$$\max F_2 = \sum_{t=1}^{8760} (\alpha_{pv} P_{pv,t} + \alpha_{wind} P_{wind,t} + \alpha_{hydro} P_{hydro,t}),$$

$$\min F_3 = \sqrt{\frac{1}{8760} \sum_{t=1}^{8760} (P_{total,t} - \overline{P_{total}})^2 / \overline{P_{total}}}.$$

模型约束包含装机上限、储能 SOC 区间、风光出力限值、外送功率约束；采用 NSGA- II 算法求解（种群规模 100，迭代 500 次），依托 AHP- 熵权 TOPSIS 筛选最优 Pareto 解。

模型设置四类约束条件，分别为生态管控下的装机规模上限、储能荷电状态区间、电力外送功率限值及水风光电源最大出力约束。

采用 NSGA- II 算法开展模型求解，设定种群规模 100、迭代次数 500、交叉概率 0.9、变异概率 0.1；结合 AHP- 熵权 TOPSIS 法计算各方案综合贴近度，遴选出系统最优配置方案。

5.3 仿真优化结果

选取年化成本、碳减排量、出力波动率作为三维优化目标，运用 NSGA- II 算法求解得到多组非支配 Pareto 解集，其三维分布特征如图 1 所示。各优化目标存在相互制衡关系，不存在单指标最优方案；借助 AHP- 熵权 TOPSIS 法对 46 组解集开展综合评分，各方案综合效益排序结果见图 2。

由 TOPSIS 评分结果筛选出全局最优配置：光伏 37000MW、风电 3295.5MW、水电 25570MW，配套抽蓄

表2 不同场景下多能协同调度策略

场景类型	核心能源出力特征	能源-储能动态匹配策略	优化调度策略
A丰水晴天大风	水电峰值、光伏日间满发、风电全天高功率，总出力过剩	抽蓄满充至库容上限，储满后余电外送	日间光伏满发，抽蓄全力储能；夜间风电充足，抽蓄持续充电
B枯水阴天小风	水电出力低谷，光伏仅额定 10%~20%，风电微弱间歇，出力不足负荷	抽蓄满发填补供电缺口，储能耗尽启用备用电源	日间光伏直供、抽蓄满发；夜间水电配抽蓄，风电辅助，按需控储能放电
C平水晴天小风	水电平稳，光伏日间为主、风电偏弱，出力昼高夜低	日间水光盈余同步抽水储能；夜间依靠水电+储能填补用电缺口	日间随光伏盈余调节抽蓄充电功率，傍晚缩减抽水预留储能，夜间梯度放电适配负荷
D平水阴天大风	水电稳定，光伏出力衰减，风电全天主力且小幅波动	风电为主、光伏为辅、水电兜底，抽蓄动态平抑风电波动	风电富余时抽蓄充电，风电出力下降时抽蓄放电，稳定整体供电出力

14688.0MWh、电化学储能 817.6MWh，年外送清洁电量 36102.05GWh。

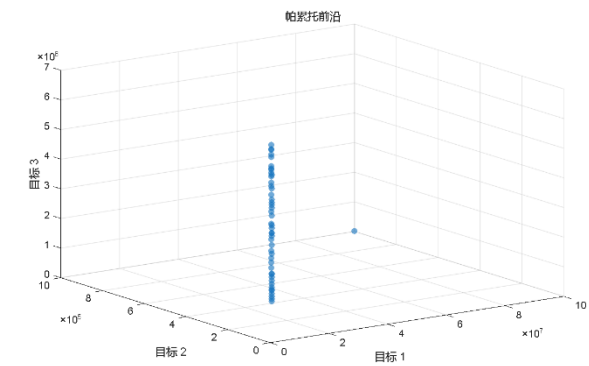


图1 NSGAII 多目标优化Pareto前沿分布图
(数据来源：本文MATLAB仿真计算)

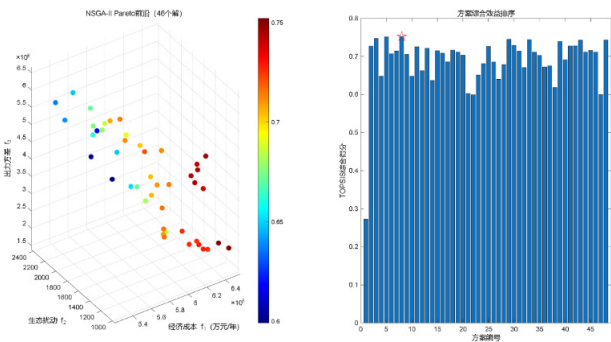


图2 各方案Topsis综合效益排序图
(数据来源：本文AHP-熵权-TOPSIS计算)

基于最优装机开展全年 8760h 逐时仿真，典型周风光出力、储能充放电及弃电时序曲线见图 3。曲线直观体现日间光储充电、夜间风水联合储能放电的分时调控逻辑，储能可实时平抑风光短时波动，大幅削减弃电峰值。

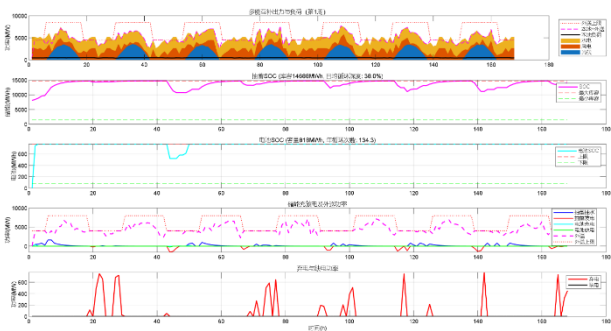


图3 典型周多能出力及储能运行曲线图
(数据来源：本文8760小时逐时仿真)

将生态红线转化为 0-1 选址约束，耦合 GIS 栅格与优化算法得到全域开发适宜性分区见图 4。分区结果划定优先、储备、禁止开发区域，筛选 12 片规模化开发区与 8 处抽水蓄能优选场址，全部设施均避让生态敏感斑块。

综合图表与量化指标可见：无协同调度场景下风光消纳差、出力波动剧烈；本文分时调度 +GIS 空间优化方

案可显著改善系统运行水平，出力波动率、弃电率大幅下降，综合能源利用效率提升 33.6 个百分点，年均碳减排 1415.26 万吨，项目全生命周期收益率 8.7%，兼顾电网安全、低碳与经济效益（见表 3）。

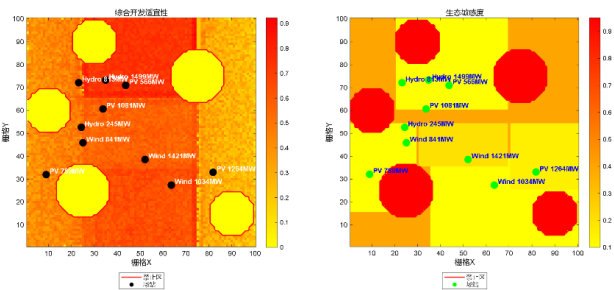


图4 甘孜州能源开发适宜性分区图
(数据来源：本文ArcGIS空间叠加分析)

表3 优化前后系统运行核心指标对比

评价指标	无协同调度基准方案	本文双尺度协同优化方案	指标改善幅度
系统出力波动率/%	45.2	26.3	下降18.9个百分点
全年弃电率/%	18.7	0.4	下降18.3个百分点
系统综合能源利用效率/%	54.8	88.4	提升33.6个百分点
年均碳减排量/万吨	—	1415.26	—
项目全生命周期收益率/%	—	8.7	—

6 多能互补系统空间格局优化

依托 GIS 与 NSGA- II 耦合多目标模型，以工程成本、生态干扰、输电损耗最小为优化导向，将生态红线、地质灾害高风险区转化为选址硬性约束，统筹全域风光水电源与储能站点空间配置。空间栅格叠加分析结果显示，研究区共确定 12 片规模化清洁能源开发区域与 8 处抽水蓄能优选场址，形成干流水电集中、高原光伏成片、河谷风电配套、储能就近并网的空间开发格局。参照图 4 开发适宜性分区结果，区域划分为优先开发、储备开发、禁止开发三类单元，各规划场址均避开生态红线核心敏感斑块，在空间层面平衡清洁能源开发与区域生态保护要求。

7 综合效益分析——多能协同能量转换效益

优化后的水风光储多能互补系统可从消纳、供电稳定、低碳三个维度提升系统运行效益。消纳效益层面，多能时空互补与混合储能协同调控有效抑制新能源出力冗余，显著降低系统弃电水平，提升清洁能源消纳利用率。供电稳定效益层面，源储荷协同调度有效平抑风光随机波动，降低系统出力震荡幅度，提升区域电网供电稳定性^[10]。低碳效益层面，高比例清洁能源替代传统火电生产，有效降低区域碳排放水平，契合高原生态保护与低碳发展要求。

8 结语

8.1 主要结论

经生态管控栅格约束下资源潜力核算, 甘孜州水能、光伏、风能技术可开发规模分别为 46320MW、54550MW、3300MW, 三类资源在日内时序、季节径流、地理空间层面具备天然互补禀赋。文中建立的日间光储、夜间风水分时协同调度机制能够有效削弱新能源出力随机波动, 系统综合能源利用效率提升至 88.4%。依托 GIS 空间解析与 NSGA-II 耦合优化模型, 可在刚性生态管控边界约束下完成全域源储场址分层遴选, 构建分区分类有序的清洁能源空间开发格局。本文搭建的全流程量化优化体系兼顾经济效益、碳减排效益与电网运行稳定, 可为青藏高原同类生态敏感型清洁能源基地规划编制提供量化技术支撑。

8.2 政策建议

(1) 搭建高原区域高精度风光水联合出力预测体系, 从源头削减新能源弃电风险。

(2) 建成区域源网荷储一体化智能调度平台, 落地双尺度分时协同调控方案。

(3) 依据开发适宜性分区成果差异化布设储能设施, 规避生态敏感区域占地。

(4) 完善高原清洁能源生态补偿机制与绿电市场化交易配套政策。

参考文献:

[1] 杨银国, 谢平平, 刘洋等. 基于深度优化算法的风光储多能互补电力系统优化调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(7): 122-131.

[2] 井志强, 王义民, 王学斌等. 水风光多能互补运行中多主体损益关系分析[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 56-67.

[3] 张远生. 碳中和视角下黄河流域多能互补模式及其影响评价研究[D]. 天津大学, 2022.

[4] Zhang Q, Bao Y. Spatiotemporal Variation Patterns of and Response Differences in Water Conservation in China's Nine Major River Basins Under Climate Change[J]. Atmosphere, 2025, 16(7): 837-837.

[5] 曹炯玮. 黄河上游水—光—风—储多能系统互补优化调度研究[D]. 青海大学, 2025.

[6] 陈志鼎, 王俊杰, 徐孝朋等. 基于抽水蓄能灵活调度效益的水风光蓄协同优化调度[J/OL]. 水电能源科学, 2026(7): 228-233.

[7] 赵宇明. 梯级水光风蓄发电系统的日前互补调度研究[D]. 西华大学, 2022.

[8] 张验科, 郭合斌, 卢焱键等. 水风光多能互补系统多目标优化调度研究进展[J]. 水利水电快报, 2025, 46(10): 101-109.

[9] 乔尚游. 多能互补模式下新能源场站储能系统效能分析与优化[J]. 现代工业经济和信息化, 2026, 16(5): 251-254.

[10] 李赫, 赵乐伟, 胡虎等. 适应新能源加入的水风光一体化系统效能评价体系[J/OL]. 人民长江, 2026, 1(1): 1-11.

基金项目: 四川民族学院大学生科研项目“碳中和目标下甘孜州水—光—风储能系统综合效益分析及空间格局优化研究”(DXS25040Z)。

作者简介: 甘斯琦(2004.02-), 女, 汉族, 四川资中人, 本科在读, 理学学士, 研究方向: 应用数学。

* 通讯作者: 万琴琴(1998.08-), 女, 汉族, 四川渠县人, 助教, 理学硕士, 研究方向: 计算机视觉。