

# 总览

需求端：

预期人均能耗：

9879kWh/年

人口结构：

固定人口总人数1011人

浮动人口在50-250人不等

**总需求约为 $1.0 \times 10^4 \text{ MWh/年}$ ，包含储能**

具体分配：

中间层：

$7.50 \times 10^6 \text{ kWh} \sim 75\% \sim$  电能

$1.00 \times 10^6 \text{ kWh} \sim 10\% \sim$  氢储能

$1.50 \times 10^6 \text{ kWh} \sim 15\% \sim$  生物燃料

末端：

$3.00 \times 10^6 \text{ kWh} \sim 30\% \sim$  工业

- 20% 重工业（广义）
- 10% 轻工业

$2.50 \times 10^6 \text{ kWh} \sim 25\% \sim$  城市建设

- 15% 交通运输
- 10% 居民生活

$2.00 \times 10^6 \text{ kWh} \sim 20\% \sim$  公共服务

- 9% 医疗
- 6% 教育
- 5% 文娱

$1.00 \times 10^6 \text{ kWh}$  ~ 10% ~ 农业

$0.90 \times 10^6 \text{ kWh}$  ~ 9% ~ 储能

$0.60 \times 10^5 \text{ kWh}$  ~ 6% ~ 科研

## 供给端 :

### 太阳能 :

太阳能分布 :

年日照时数 : 2200h

年均太阳辐射量 :  $1500 \text{ kwh/m}^2$

太阳能目标发电量 :  $4 \times 10^6 \text{ kWh/年}$

### 地热能 :

地热能分布稳定 , 几乎不受外部环境影响

目标发电量 :  $6 \times 10^6 \text{ kWh/年}$  ~ 供暖利用换算 ~

### 风能:

## 细节设计

### 太阳能

#### 能量密度

洱源县年均太阳辐射量为 120-140 千卡/平方厘米 ~  $1400-1600 \text{ kwh/m}^2$  ~

数据来源 :

《洱源县光伏可行性研究报告》

洱源县气象局《年度气象年报》、《太阳辐射观测专题报告》

云南省能源局《云南省可再生能源发展“十四五”规划》、“区域太阳能资源评估”章节

#### 空间分布

坝区 ~ 海拔 1900 ~ 2100 米 ~ :

以右所镇、三营镇为核心 , 年日照时数 2200 ~ 2400 小时 , 太阳总辐射量 5000 ~ 5500 兆焦 / 平方米 , 是集中式光伏电站最优区 ;

山区（海拔2100米以上）：

如牛街乡、凤羽镇，因多云雾，年日照时数1800~2200小时，总辐射量4500~5000兆焦/平方米，更适合分布式光伏（屋顶光伏）与光热利用（太阳能热水器）。

数据来源：

洱源县自然资源局《太阳能资源普查与开发利用专项规划》

洱源县发展和改革局《“十四五”新能源产业布局方案》“乡镇级资源分区”划定。

## 时间分布

受亚热带高原季风气候驱动，洱源县太阳能时间分布呈“旱季强、雨季弱”“冬春足、夏秋抑”特征：

季节差异：

旱季（11月—次年4月）：

受大陆性季风控制，晴朗少云，月均日照时数200~250小时，太阳辐射总量占全年约60%；雨季（5月—10月）：

受西南季风影响，多阴雨、低云，月均日照时数150~200小时，辐射总量占比约40%。

月度差异：

典型月份中，5月（旱季后期）日照超220小时，太阳总辐射量月均超500兆焦/平方米；7—8月（雨季峰值）日照仅160~180小时，辐射量月均降至400兆焦/平方米以下。

数据来源：

洱源县气象局《月气候影响评价报告》、《年度太阳辐射监测年报》

洱源县人民政府《年度气候公报》“光照资源分析”章节。

## 利用方式和数据

### 光伏发电

在光伏发电上，采用TOPCon太阳电池——这是一种TOPCon电池是一种基于选择性载流子原理的隧穿氧化层钝化接触太阳电池技术，转化效率为26%

[RICHTER A, MÜLLER R, BENICK J, et al. Design rules for high-efficiency both-sides-contacted silicon solar cells with balanced charge carrier transport and recombination losses [J]. *Nature Energy*, 2021, 6(4):1-10. doi:10.1038/s41560-021-00805-w]

## 光热发电

在光热发电上，采用高成本的碟式发热，效率为25%-30%，取26%便于计算。

[Graham-Cumming J. *The Geek Atlas: 128 Places where science & technology come alive*[M]. USA: O'Reilly Media, Inc, 2009.]

用于太阳能发电的总面积为 $10256\text{m}^2$ ，这部分面积会与建筑面积重叠，不占用额外空地。

光伏与光热联合发电，光伏在白天有日光时提供发电，光热在白天发电的同时，通过储热系统实现夜间发电。

## 地热能

### 能量密度

温度范围：

地表温泉温度普遍在 $40^\circ\text{C}$  -  $90^\circ\text{C}$ 之间，地下2000米以浅的地热流体温度可达 $150^\circ\text{C}$ 以上，部分区域超过 $200^\circ\text{C}$ ，具备发电潜力。

年平均可用的热能功率：

如果仅考虑天然补给和可持续开采部分，其可持续开采的热能功率潜力估计可达 80-100 MW<sub>电</sub>。

前沿科技视角—未来愿景：

如果应用增强型地热系统技术，开发深度3000-5000米、温度 $>150^\circ\text{C}$ 的干热岩资源，其理论资源量将是现有浅层资源的数倍至数十倍。一个中等规模的EGS项目—占地1-2平方公里—即可持续提供 5-10 MWe<sub>电</sub> 的发电能力，对应的热功率在 25-50 MW。

大理州洱源县地表至埋深3500m范围内的干热岩资源量约合 $5.69 \times 10^8$ 吨标准煤，埋深3500m至7000m范围内的干热岩资源量约为 $9.16 \times 10^{10}$ 吨标准煤，总资源量约为 $9.22 \times 10^{10}$ 吨标准煤，具有良好的地热资源开发前景。

[毛倩菲. 云南洱源县地热资源三维地质建模及干热岩资源量计算[D]. 北京:中国地质大学(北京),2024.]

## 空间分布

核心热田面积：

主要的九气台-温水热田，其有利的热储分布面积约为30平方公里，县城核心区，硫磺泉为主，康养疗愈价值高，衍生出独特的“春浴”民俗。牛街乡的资源总量最具优势，适合大规模、多元化的开发。

地热出露点：

全县已发现的天然温泉出露点超过100处，平均每10平方公里就有一处地热显示，分布密度极高。

主要热田/集中区：

1. 牛街热田：

县境北部，出露高温温泉，地热井口温度高。

2. 右所-三营热田：

县境中部，地热活动强烈，温泉众多，是当前旅游开发和农业温室利用的主要区域。

3. 九气台片区：靠近县城，以“硫磺温泉”著称。

热流密度：

在核心区，地表热流值可高达 $100-120 \text{ mW/m}^2$ ，远高于中国大陆地区平均值（约 $60 \text{ mW/m}^2$ ），显示出极佳的能量聚集性。

在研究区域内，大地热流值的丰沛表明这里蕴藏着巨大的地热资源潜力，普遍超过了 $90 \text{ mW/m}^2$ 的标准。

[毛倩菲. 云南洱源县地热资源三维地质建模及干热岩资源量计算[D]. 北京:中国地质大学(北京),2024.]

茈碧湖地热田地温场呈条带状分布，受金沙江-洱海断裂带控制，构成二元热储结构：上部为第四系冲积层孔隙型层状热储（面积 $3.696 \text{ km}^2$ ），下部为盆地基岩裂隙型带状热储（面积 $2.4 \text{ km}^2$ ）。经评价，热田地热水资源总量为 $2.971 \times 10^{14} \text{ kJ}$ ，有效资源总量为 $7.322 \times 10^{12} \text{ kJ}$ ，发电量为 $2321 \text{ kW}$ 。热田地热水允许开采量为 $10048.6 \text{ m}^3/\text{d}$ ，为地热资源开发利用与保护提供重要依据。

[大理洱源茈碧湖地热田热水资源评价[J]. 云南地质,2012(1):89-92.]

洱源地区地热水资源丰富，分布范围广。洱源盆地主要位于剑川、下关、金平高温地热带内，水热活动主要分布在牛街、三营、洱源、炼城、下山口-右所等三个区域内。区内温泉呈带状分布，多且分布广，拥有热泉、热水泥塘、人工钻井等形式的丰富地热显示。共有55个温泉点，包括18处自然流露温泉，37处人工温泉井。牛街-三营片区共有24处温泉，包括10处自然温泉。

和14处人工温泉。水温一般在 $60\sim75^{\circ}\text{C}$ ，最高可达到 $80^{\circ}\text{C}$ ；洱源县城、炼铁片区共有10处温泉，包括2处自然泉和8处人工温泉。水温一般在 $63\sim70^{\circ}\text{C}$ ，最高可达到 $88^{\circ}\text{C}$ ；下山口、右所片区共有21处温泉，包括2处自然泉和19处人工温泉。下山口及坡头村一带水温一般在 $36\sim60^{\circ}\text{C}$ 。

[张晓晗. 基于GIS的地热有利区预测--以大理洱源地区为例[D]. 北京:中国地质大学(北京),2024.]

## 时间分布—稳定性

长期稳定性：不受昼夜、季节和天气变化的影响。

短期波动：

在自然状态下，单个温泉的流量和温度可能会有极微小的季节性波动，但这对于工程化开发利用（如打井取热）的影响可以忽略不计。通过供需关系动态调节和科学回灌，可以确保地热田压力的长期稳定，实现可持续开采。

设备维护：

腐蚀和结垢是地热能利用过程中常见的问题。因地热水中含多种离子，矿化程度高，尤其是氯离子，通过电化学反应腐蚀管道、深井泵、换热器等装置与设备，需投入大量资金对其进行维修以保证正常发电。现多采用涂防腐层、选择防腐材质、充氮注硫等方法减轻腐蚀现象。结垢是地热水利用过程中的另一大难题，该难题也与地热水的成分有关。在地热岩附近高温高压的环境下，地热水可溶解多种可溶性矿物质，但在提至地面的过程中，随着周围温度、压力的变化，可溶性矿物质逐渐析出并附着于管道等设备表面，形成垢层，降低地热水的流动性与传热器的传热效率。目前，常见的防垢技术包括添加化学阻垢剂、电磁场等物理除垢、涂层防垢等。

[李克勋, 宗明珠, 魏高升. 地热能及与其他新能源联合发电综述[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 79-87  
doi:10.12096/j.2096-4528.pgt.19013]

通过新材料的应用和AI+机器人协作维护，能够实现长期稳定运转。

如果遇到自然灾害，采用氢能、电能等备用能源也能通过人类机器协作进行修缮。

## 利用方法和数据

直接利用：

1. 医疗洗浴与旅游：温泉度假、疗养
2. 农业供暖：利用中低温地热水为种植模块和养殖模块供暖  
（反季节蔬菜、花卉，甚至热带水果和热带动物等）。
3. 城乡供水、供暖：为居民提供生活用热水以及冬季供暖。
4. 联合供能：为嗜热藻类提供60摄氏度的生长环境，和生物质能生产结合。

间接利用：

1. 高温地热发电：

- 闪蒸发电：适用于温度在 $150^{\circ}\text{C}$ 以上的高温热水田。将高温地热水引入低压罐，部分热水迅速“闪蒸”成蒸汽，推动汽轮机发电。
- 双级扩容法工艺流程以及设备相对复杂，但系统转换效率大大提高，在相同冷热源的条件下，热效率可提高 $20\% \sim 30\%$ 。

[刘广林, 吕鹏飞. 简述地热发电利用形式 [J]. 科技创新导报, 2013, (28): 68.]  
而已经成熟的单级扩容法工艺效率低于 10%

- \*[刘广林, 吕鹏飞. 简述地热发电利用形式 [J]. 科技创新导报, 2013, (28): 68.] \*
- 因此我们把闪蒸法的效率按 25% 计算。

2. 中低温地热发电：

对于洱源大量存在的 $90^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 的地热流体，传统的闪蒸发电效率低。  
双循环发电(ORC)：地热水通过换热器加热一种低沸点工质（如异丁烷），工质汽化推动涡轮机发电。这种方式可以充分利用不能直接闪蒸的中低温资源，提高整体利用率。  
以热效率为优化目标函数，通过模拟对比得出，当蒸发温度为 $111^{\circ}\text{C}$ ，一级闪蒸温度为 $100^{\circ}\text{C}$ ，二级闪蒸温度为 $95^{\circ}\text{C}$ ，干度为 0.9 时，系统获得最大热效率为 14.82%，对应的预热器出口热源水温度为 $80.46^{\circ}\text{C}$ 。

[蒋执俊. 有机朗肯闪蒸地热发电系统性能影响模拟及试验研究[D]. 浙江:浙江大学, 2023.] (废案)

全流螺杆膨胀机

将热水全部引入螺杆膨胀机做功，在引入之前无需处理，因而能量利用率较高。现学界普遍认为全流螺杆膨胀机的内效率可达 65%-75%。

[吴方之. 全流地热螺杆膨胀机发电技术在地热电站的应用研究[J]. 地热能, 2015, 0(5):8-11.]  
在本试验条件下，试验机的最大功率为 $3.2\text{kW}$ ，有最佳干度为 0.1，有效效率达 38%。对于较大容量的机组，效率可望提高。

[胡亮光, 庞凤彪, 王之安, 范文伯, 吕灿仁. 中低温能源全流发电螺杆膨胀机的性能及实验研究[J]. 工程热物理学报, 1989, 10(4):353-356]

## 数据计算

注：由于信息获取渠道有限，不可能进行实地考察，洱源县地下热水的具体参数无法精确获得，故本文给出范围并从低估计。

以闪蒸法计算，取 25% 的效率，为产生每年 250 万千瓦时的电力，需要每小时给出约 10 吨高温水（直接钻孔进入地层开采）用于发电。

而对于中低温热水，根据已有的数据来看，洱源县可持续开采的热能功率潜力估计可达80-100 MW，其中大部分为中低温热水。

取1.1%即1.67MW，算入更大的规模和新材料的应用，膨胀机和发电机联合工作的效率按45%计算，则可以做到年发电量350万千瓦时。

此处计算尚未考虑联合梯级利用和多能联合系统，因此该方案完全可行，也有充足余量容纳更多人口（包括外来）。

日后随着干热岩资源的开发和多能的利用，能源的供给必将更加丰富。

## 创新设计

### 地热-多能联合系统：

虽然地热能本身稳定，但其利用效率可以与其他可再生能源耦合而提升。

例如，在日照强烈的白天，利用太阳能集热器预热补给水，再注入地热系统，可以“减轻”地热储层的负担。

同时，根据卡诺原理，热源温度越高，热机理论效率越高。可以通过太阳能、燃烧燃料等高品位热能提高发电工质的初始温度，从而在整体上提高系统的全生命周期效率和可持续性。

生物质能虽热量少，但温度高的优势不容忽视。赵波等提出将生物质燃气（生物质能的一种形式）与热量大、温度相对较低的中低温地热能相结合，用于联合发电，具有良好的经济可行性，并大大提高发电功率。生物质原料（如秸秆等）经酸化水解、厌氧发酵后生成生物质燃气，进入燃气锅炉燃烧，对已经受到地热水加热的低沸点工质进行二次加热，使之由饱和蒸汽转为过热蒸汽，随后进入发电机组实现热能-机械能-电能的转变。该系统的设计思路经热力循环性能分析和发电成本评估，结果表明发电功率可达单一地热发电系统的4.1倍，发电成本可随生物质能利用分数的提高而大幅度降低。

[李克勋, 宗明珠, 魏高升. 地热能及与其他新能源联合发电综述[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 79-87  
doi:10.12096/j.2096-4528.pgt.19013]

### 量子点太阳能电池：

### 联合梯级利用：

这是对整个系统的规划和补充。首先利用高温和较高温流体（>90°C）进行发电，发电后的尾水（70°C-80°C）用于区域供暖，再次降温后的水（40°C-50°C）供给种植模块和养殖模块，最后

回灌到地下。这种“温度对口”梯级利用”的模式能将地热能的“综合利用率”提升至70%-80%以上。

## 矿物提取：

地热流体中常富含锂、铷、铯、硅等有价元素。通过膜分离、吸附法等先进提取技术，可以从地热卤水中提取高纯度矿物质，将地热田变为“液态矿山”，极大提升其经济价值。

## 干热岩开发：

如果应用增强型地热系统技术，开发深度3000-5000米、温度>150°C的干热岩资源，其理论资源量将是现有浅层资源的数倍至数十倍。一个中等规模的EGS项目（占地1-2平方公里）即可持续提供 5-10 MWe（兆瓦电）的发电能力，对应的热功率在 25-50 MW。

大理州洱源县地表至埋深3500m范围内的干热岩资源量约合 $5.69 \times 10^8$ 吨标准煤，埋深3500m至7000m范围内的干热岩资源量约为 $9.16 \times 10^{10}$ 吨标准煤，总资源量约为 $9.22 \times 10^{10}$ 吨标准煤，具有良好的地热资源开发前景。

[毛倩菲. 云南洱源县地热资源三维地质建模及干热岩资源量计算[D]. 北京:中国地质大学(北京),2024.]

## 二氧化碳工质流：

未有明确效率数据，但采热效率较高，化学惰性大，腐蚀风险较小，可在储层中封存CO2，适用于低渗透干燥地质条件，表现出明确的优越性，可作为远景规划和技术储备。

[秦佐已,金铁斌,胡俊杰,等. 超临界二氧化碳增强型地热系统研究综述[J]. 安全与环境工程,2025,32(4):1-11. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20241102.]

超临界CO2循环在地热与太阳能混合系统中也发挥着重要作用，有效地耦合较低温度的地热和较高温度的太阳能热，系统热效率得以提高，㶲效率也比单独的太阳能热的循环系统提高了5%~10%

[郑开云, 黄志强. 基于超临界CO2循环的地热与太阳能混合系统研究[J]. 新能源进展, 2018, 6 (1): 62- 68.]

## 同轴深井换热技术、环保考虑：

这是一种“取热不取水”的闭环技术，通过向深井中注入循环工质与岩石换热，几乎100%的流体被循环利用，避免了流体消耗和化学污染，虽然初始投资高，但长期运行的能量回报率和环境效

率极高 °