

云南省9个景区热气球旅游观光的气象适宜性评估与区域优选研究

段永硕, 夏 兰*, 段顺虎, 刘宝云, 魏 琦, 赵悦茨

云南大学地球科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年9月9日; 发布日期: 2026年9月20日

摘 要

热气球旅游作为低空休闲旅游的重要形式, 其发展高度依赖气象条件。本研究选取云南省9个热气球旅游潜力景区为研究对象, 以2014~2024年ERA5再分析气象数据为基础, 基于空间降尺度与多要素地形校正构建景区尺度精细化气象数据, 结合热气球飞行安全要求制定多要素综合阈值可飞日判定标准, 构建综合评估体系, 系统分析9个景区可飞日的数量、季节分布及最长连续可飞日特征。结果表明: 云南热气球旅游可飞日整体呈现冬春季多、夏秋季少的季节特征, 以干季稳定的气象条件为核心飞行期。景区间可飞日差异显著, 泸沽湖、傣族园年平均可飞日达114天以上, 元阳哈尼梯田仅63天。9个景区可划分为三级适宜性等级, 一级适宜区(泸沽湖、傣族园)气象条件最优, 年均可飞日数量多且连续可飞性强; 二级适宜区(抚仙湖、民族村、普者黑)气象条件良好, 可飞日规模与稳定性兼具; 三级适宜区(桃源坝、哈尼梯田、太平湖、邵女坪)气象条件一般, 可飞日分散且连续飞行窗口短。研究结果为云南省热气球旅游观光的科学选址、运营时段规划及气象保障体系建设提供量化依据与实践参考。

关键词

热气球旅游, 气象适宜性, 可飞日, 地形校正, 层次分析法, K-Means聚类, 云南省

Meteorological Suitability Assessment and Regional Optimization of Hot Air Balloon Tourism in Nine Scenic Areas of Yunnan Province

Yongshuo Duan, Lan Xia*, Shunhu Duan, Baoyun Liu, Qi Wei, Yueci Zhao

School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: August 4, 2026; accepted: September 9, 2026; published: September 20, 2026

*通讯作者。

文章引用: 段永硕, 夏兰, 段顺虎, 刘宝云, 魏琦, 赵悦茨. 云南省9个景区热气球旅游观光的气象适宜性评估与区域优选研究[J]. 可持续发展, 2026, 16(9): 150-163. DOI: 10.12677/sd.2026.169323

Abstract

As an important form of low-altitude leisure tourism, hot air balloon tourism is highly dependent on meteorological conditions. To clarify the spatial differentiation characteristics of meteorological suitability for hot air balloon tourism in Yunnan, this study selected 9 potential scenic spots for hot air balloon tourism in Yunnan Province. Based on ERA5 reanalysis meteorological data from 2014 to 2024, a refined scenic-scale meteorological dataset was constructed through spatial downscaling and multi-factor terrain correction. Combined with the safety requirements of hot air balloon flight, a multi-factor comprehensive threshold criterion for flyable days was formulated. On this basis, a comprehensive evaluation system including the number of flyable days, adaptability of core meteorological elements, stability of flyable periods, and temporal continuity was constructed to systematically analyze the number, seasonal distribution and characteristics of the longest consecutive flyable days of the 9 popular scenic spots. The analytic hierarchy process was used to complete the quantitative evaluation of meteorological suitability. The K-means clustering algorithm was applied to classify the suitability levels. The results show that flyable days of hot air balloon tourism in Yunnan generally exhibit a seasonal characteristic of more in winter and spring and fewer days in summer and autumn, with the stable meteorological conditions during the winter monsoon season as the core flight period. There are significant differences in flyable days among scenic spots: Lugu Lake and Dai Ethnic Garden have an annual average of over 114 flyable days, while Yuanyang Hani Terraces only have 63 days. The 9 scenic spots can be classified into three suitability levels. The first-level suitable areas (Lugu Lake, Dai Garden) feature the best meteorological conditions, with a high annual number of flyable days and strong continuity of flyable periods. The second-level suitable areas (Fuxian Lake, Ethnic Village, Puzhehe) have favorable meteorological conditions, offering both a substantial number of flyable days and stable flying windows. The third-level suitable areas (Taoyuanba, Hani Rice Terraces, Taiping Lake, Shaonvping) have scattered flyable days and short consecutive flight windows. These findings provide quantitative basis and practical references for the scientific site selection, operation period planning and construction of meteorological support system for hot air balloon tourism in Yunnan Province.

Keywords

Hot Air Balloon Tourism, Meteorological Suitability, Flyable Days, Terrain Correction, Analytic Hierarchy Process, K-Means Clustering, Yunnan Province

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

低空经济是以低空飞行活动促进产业融合发展的综合性经济形态，“低空经济 + 旅游”是其核心应用场景之一[1]。近年来，随着我国休闲旅游消费升级与低空空域管理改革的逐步深化，热气球旅游凭借兼具体验性与观赏性的独特优势，成为旅游产品多元化与创新的重要方向。但是，气象条件的适宜性与稳定性已成为热气球旅游发展的核心制约因素之一，而精准的气象适宜性评估则是景区科学规划、运营调度与安全保障的重要前提。

云南地处低纬高原，民族多样性突出，有喀斯特峰林、高原湖泊、梯田村寨等多样化自然人文景观，为热气球旅游观光提供了优质的景观基底[2]。但是，受季风与高原地形的共同作用，云南气候类型复杂

多样,气象条件空间异质性显著,湿季强对流天气频发,对低空飞行安全构成挑战,这种气候特征在赋予热气球旅游发展潜力的同时,也提出了精细化气象适宜性评估的现实需求。目前云南省部分景区已开展热气球旅游试点,但受气象条件认知不足与适配性评估缺失影响,尚未形成科学的区域布局与运营体系,亟需开展系统性的气象适宜性评估与区域优选研究。

国内外关于航空旅游气象适宜性的研究多聚焦于民航、通用航空的气象保障[3]-[6],针对热气球等低空休闲航空的研究相对较少,难以满足低空旅游景区的精细化运营与区域优选需求。此外,针对高原山地区域的研究,常因气象数据分辨率不足,难以精准刻画景区尺度的气象特征,热气球旅游观光的气象适宜性评估不足。

基于以上问题,本研究以云南省9个热门景区为研究对象,围绕景区尺度气象数据精细化处理、可飞日科学判定、气象适宜性综合评估、适宜性等级区划四大核心环节开展研究,通过降尺度与地形校正提升气象数据的空间精度,构建多维度气象适宜性评估体系,结合数理统计与空间分析方法揭示云南热气球旅游气象适宜性的时空特征与空间分异规律,筛选气象适宜性最优的景区并划分适宜性等级。

2. 研究景区和数据

2.1. 研究景区

为精准筛选出兼具气象适配性、景观独特性与运营可行性的研究对象,本研究以云南省4A、5A级景区为初始候选池,结合安全适配指标(无禁飞区等)、生态合规(规避自然保护区核心区等符合生态保护相关法律法规要求)以及规划契合度(景区已被纳入云南省或属地州市低空旅游发展规划、文旅产业专项规划等)[7]等因素,聚焦适配景区,最终确定9个热气球旅游潜力景区,即傣族园景区、元阳哈尼梯田、太平湖森林小镇、普者黑景区、世外桃源坝美景区、泸沽湖摩梭文化旅游区、抚仙湖禄充风景区、云南民族村景区、邵女坪旅游度假区小镇(后续分别简称为:傣族园、哈尼梯田、太平湖、普者黑、桃源坝、泸沽湖、抚仙湖、民族村、邵女坪)作为本研究的具体研究对象。

2.2. 数据

本研究采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的ERA5再分析数据集。ERA5是ECMWF最新一代全球大气再分析产品(<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>),已在气候分析、气象灾害评估及航空气象条件研究等领域得到广泛应用[8]。研究选取2014~2024年共11年的逐小时数据,聚焦热气球旅游常规运营时段(每日08:00~20:00),提取影响热气球飞行安全与稳定性的关键气象要素,包括近地面10 m风速、低云量、降水量、大气静力稳定度及垂直风切变。为保证气象要素降尺度结果的可靠性,本研究采用中国气象局地面气象站点观测数据进行对比验证,包括10 m风速、降水量和气温等观测数据,时间为1980~2024年。

3. 研究方法

3.1. 数据降尺度与地形校正

ERA5原始数据的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (约合 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$),而本研究的评估对象为小范围景区(单个景区面积多在 $10\sim 100\text{ km}^2$)。结合不同气象要素的分布特性,选用线性插值(含双线性插值)与三次插值(含双三次插值)实现降尺度,进行水平与垂直双向插值[9]。

云南高原山地地形起伏剧烈,海拔、坡度、坡向等地形因子通过改变近地面热力、动力条件,直接影响气温、风速、降水量、低云量等气象要素的空间分布规律,如海拔升高引发气温垂直递减、坡度差异造成地形阻挡对风速的削弱、坡向分异影响局地降水与云量分布等。因此,本研究基于数字高程模型

(DEM)对降尺度数据再进行地形校正,以提升气象数据与研究区实际地形下垫面的匹配度。

基于降尺度后气温数据网格对应的海拔值,结合气温垂直递减率构建线性校正模型[10],对降尺度气温数据进行逐网格修正,校正公式如下:

$$T_{\text{校正}} = T_{\text{降尺度}} - 0.53 \times \frac{\Delta H}{100}$$

其中, $T_{\text{校正}}$ 为地形校正后气温值(°C), $T_{\text{降尺度}}$ 为插值降尺度后的原始气温值(°C), ΔH 为各网格海拔与研究区平均海拔的差值(m)。

针对近地面风速受地形阻挡的削弱作用,采用坡度分级修正方法开展风速地形校正。基于 DEM 提取的坡度数据,结合云南山地地形动力特征,为不同坡度等级设定差异化风速修正系数(0.95~0.75),坡度越大,修正系数越小,以量化地形阻挡对风速的削弱效应。

低云量与降水量校正结合坡向分异特征(阳坡、阴坡)开展局地校正,云南受西南季风主导,迎风坡(西南坡)易形成地形抬升,降水与低云量相对较高;背风坡(东北坡)气流下沉,降水与低云量相对较低。基于 DEM 提取的坡向数据,将坡向分型数据与降尺度后的低云量、降水量数据进行空间匹配,开展地形校正,校正公式如下:

$$P_{\text{校正}} = P_{\text{降尺度}} \times (1 + \alpha)$$

$$C_{\text{校正}} = C_{\text{降尺度}} + \beta$$

其中, $P_{\text{校正}}$ 、 $C_{\text{校正}}$ 分别为地形校正后的降水量(m)、低云量值, $P_{\text{降尺度}}$ 、 $C_{\text{降尺度}}$ 分别为插值降尺度后的原始降水量、低云量值, α 为降水量坡向微调系数(阴坡+0.05~+0.10、阳坡-0.03~-0.05), β 为低云量坡向微调系数(阴坡+0.5~+1、阳坡-0.3~-0.5)。

同时,降水量校正除考虑地形影响外,还叠加海拔垂直递减效应,采用 0.0005 m^{-1} 的降水垂直递减率(海拔每升高 1000 m, 降水量增加 50%)进行校正。

3.2. 可飞日判定方法

可飞日的判定采用多要素综合阈值法:近地面 10 m 风速 $\leq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 低云量 $\leq 5/10$, 无降水, 大气静力稳定性为稳定状态, 垂直风切变强度为轻度(表 1)。在此基础上规定,若某景区在每日 08:00~20:00 运营时段内,同时满足上述全部气象条件的持续时长达到 3 h 以上,则该日记为该景区的一个可飞日[11]。

Table 1. Criteria for intensity of vertical wind shear of horizontal winds [12]

表 1. 水平风的垂直风切变强度标准[12]

强度等级	数值标准	
	米/秒/30 米	米/秒
轻度	0~2	0~0.07
中度	2.1~4	0.08~0.13
强烈	4.1~6	0.14~0.20
严重	>6	>0.20

3.3. 层次结构设计

基于热气球旅游气象适宜性评估的核心诉求,本研究构建“目标-准则-方案”三层递进式层次结构模型(图 1)。其中,目标层明确为云南 9 个景区热气球旅游气象适宜性综合评估,旨在通过多维度量化

分析输出科学的适宜性排序结果。准则层选取 4 个核心影响维度——可飞日数量、核心气象要素适配性、可飞时段稳定性、时间连续性，系统涵盖气象条件对热气球飞行安全、体验质量与规划可行性的关键影响因素。方案层以研究选取的云南 9 个景区为具体评估对象，通过准则层的多维度对比实现适宜性综合评判，最终形成完整的云南热气球旅游气象适宜性评价体系。

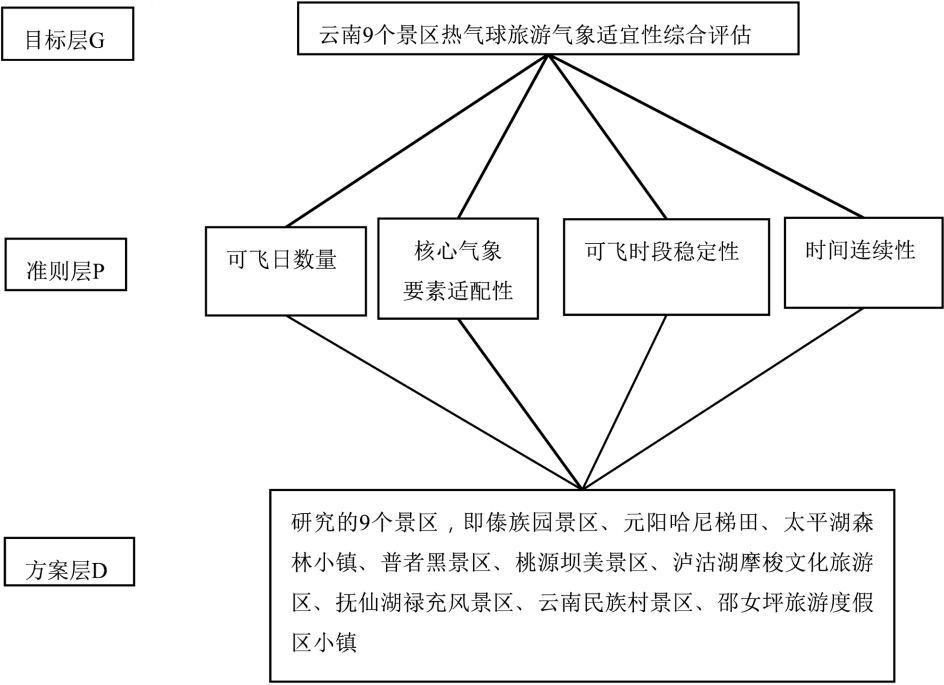


Figure 1. Hierarchical structure model of meteorological suitability evaluation system for hot air balloon tourism
图 1. 热气球旅游气象适宜性评价体系的层次结构模型

- (1) 可飞日数量：评估时段内景区满足可飞日判定标准的总天数，是适宜性的基础规模指标。基于每日气象观测数据，按“近地面风速 $\leq 6\text{ m/s}$ 、低云量 $\leq 5/10$ 成、无降水、大气静力稳定度稳定、垂直风切变轻度”的标准，统计连续达标时长 > 3 小时的单日总数，记为 F_i (i 为景区编号)。
- (2) 核心气象要素适配性：景区可飞时段内核心气象要素的达标程度，直接关联飞行安全。选取近地面风速、低云量、降水、大气静力稳定度、垂直风切变 5 个核心要素，分别计算各要素达标时长占总观测时长的比例，采用等权重法(地面风速权重为 0.3、降水量权重为 0.3、垂直风切变权重为 0.2、低云量和大气静力稳定度权重分别为 0.1)计算加权平均值，记为 M_i 。
- (3) 可飞时段稳定性：景区每日可飞时长的波动程度，波动越小越利于旅游调度。基于每日可飞时长数据，计算变异系数 $CV_i = (\text{每日可飞时长标准差})/(\text{每日可飞时长平均值})$ ，为统一“数值越大越优”的评估逻辑，对变异系数进行反向处理，得到稳定性指标 $S_i = 1/CV_i$ 。
- (4) 时间连续性：景区可飞日的连续分布特征，连续时长越长越便于旅游线路规划。统计目标时段内景区最长连续可飞天数 L_i ，结合可飞日总数 F_i ，构建时间连续性指数 $C_i = L_i/F_i$ (指数范围 0~1，越接近 1 表示连续性越好)。

准则层判断矩阵的构建遵循“安全优先、体验为辅、规划适配”的核心原则。结合热气球飞行行业经验与相关咨询，采用 Saaty (1980) [13]提出的 1~9 标度法[14]对各准则进行两两比较，确定 4 个准则的重要性排序为“核心气象要素适配性 $>$ 可飞日数量 $>$ 可飞时段稳定性 $>$ 时间连续性”，据此构造 4×4 判断矩阵(表 2)。

Table 2. Judgment matrix of the criterion layer
表 2. 准则层判断矩阵

准则	核心气象要素适配性	可飞日数量	可飞时段稳定性	时间连续性
核心气象要素适配性	1	3	5	7
可飞日数量	1/3	1	3	5
可飞时段稳定性	1/5	1/3	1	3
时间连续性	1/7	1/5	1/3	1

4. 研究结果

4.1. 降尺度和地形校正数据验证

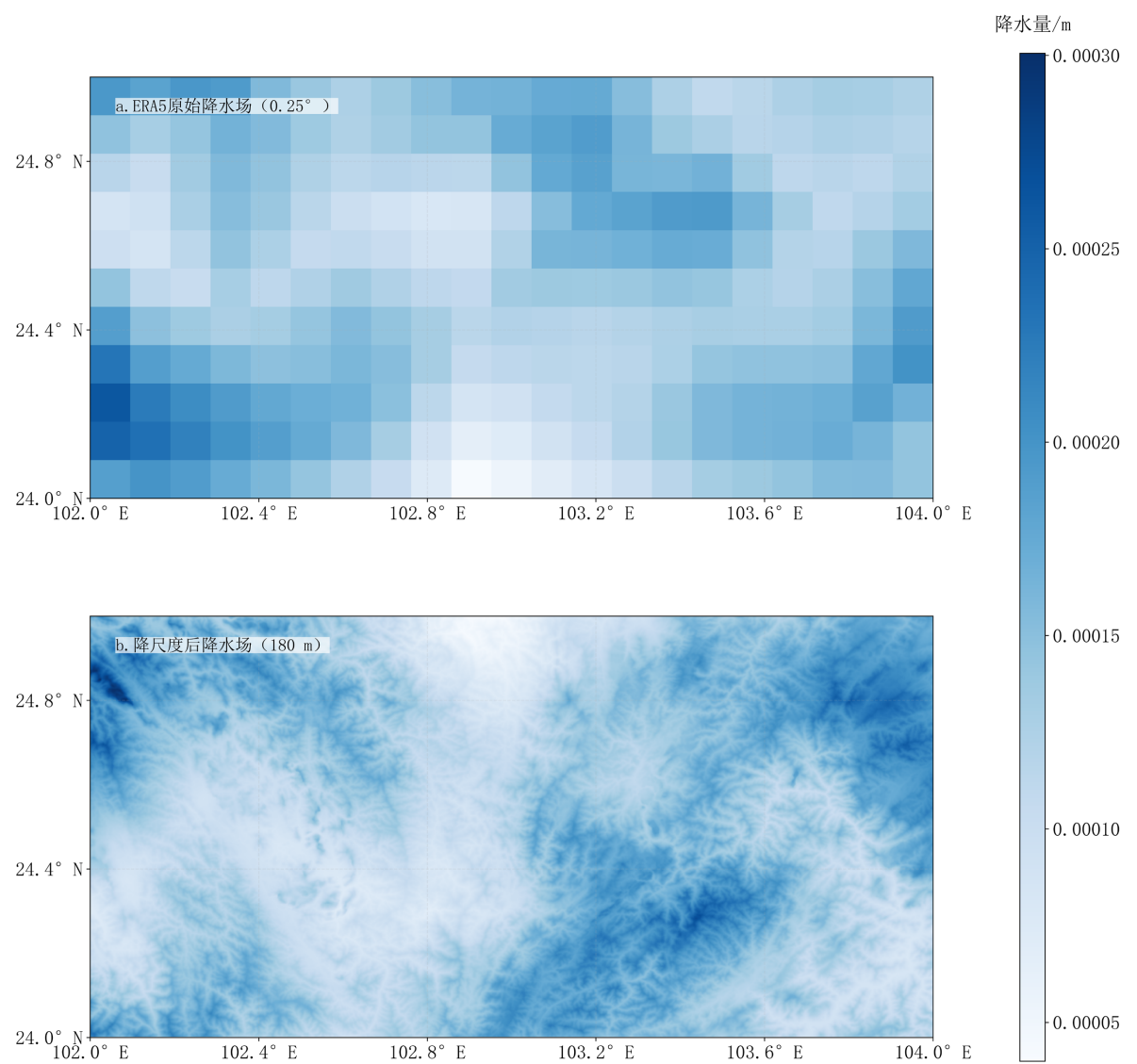


Figure 2. Spatial distribution of precipitation at 08:00 on December 1, 2024 in Kunming: (a) ERA5 data and (b) with downscaling and topographic correction
图 2. 2024 年 12 月 1 日 08:00 昆明区域降水量空间分布：(a) ERA5 原始数据，(b) 进行了降尺度与地形校正后

从 2014~2024 年全时段验证结果来看, 降尺度与地形校正后数据与站点实测数据均呈现中高强度正相关关系, 2 m 气温相关系数达 0.9535, 降水量的相关系数为 0.5784, 10 m 风速的相关系数为 0.8147, 表明校正后数据集能够较好地反映实测数据的变化趋势与波动特征, 均通过置信度为 95% 的显著性检验。其中, 气温与 10 m 风速相关线偏高, 而降水的相关性略低。整体而言, 经降尺度与地形校正后的数据集与站点实测数据变化趋势高度吻合。

在月尺度上, 2 m 气温各月相关系数介于 0.84~0.94 之间, 全年稳定性最优。降水量各月相关系数区间为 0.48~0.71, 变化幅度较大, 春末至秋季(4~10 月)相关性显著高于夏初(6~7 月)。10 m 风速各月相关系数介于 0.67~0.86 之间, 秋季(9~11 月)相关性表现相对较差。整体而言, 气温月度相关性最高且波动最小, 风速次之, 降水月度波动相对明显, 均与站点实测资料有较好的吻合。

图 2 为 2024 年 12 月 1 日 08:00 降水降尺度与地形校正前后的空间分布对比, 如图 2(b)所示降水空间分布呈现出显著的地形相关性, 高值区(深蓝色)主要集中在研究区的西部、西南部及东南部, 对应地形起伏较大的山地丘陵地带; 低值区(浅蓝/白色)则出现在中部及东南部的相对平缓区域。这种“山地高、平地低”的分布特征, 与地形抬升作用的降水规律高度吻合, 暖湿气流在迎风坡被迫抬升、冷却凝结, 形成更多降水; 而背风坡或低海拔平原则因下沉增温效应, 降水显著减少。

4.2. 可飞日总体特征

基于热气球旅游可飞日判定方法, 对 2014 年至 2024 年云南 9 个景区开展可飞日量化统计(表 3)。不同景区可飞日数量差异显著, 年平均可飞日极值差达 57 天。从可飞潜力来看, 泸沽湖、傣族园为可飞潜力最高梯队, 元阳哈尼梯田为最低梯队, 多数景区年际可飞日波动集中在±15%范围内。

Table 3. Number of flyable days and annual average flyable days of 9 scenic spots in Yunnan, 2014~2024

表 3. 云南 9 个景区 2014~2024 年可飞日数与年平均可飞日

景区	年份	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	平均值
普者黑		82	96	78	73	72	95	85	76	70	93	57	80
桃源坝		67	70	109	74	78	75	78	67	69	106	69	78
民族村		88	104	75	82	99	106	94	81	92	91	60	88
泸沽湖		112	128	119	110	126	124	118	120	110	147	111	120
傣族园		116	100	105	91	76	152	147	103	106	136	126	114
哈尼梯田		98	102	44	43	43	75	63	51	49	66	59	63
太平湖		86	88	74	59	78	75	73	79	76	97	57	77
抚仙湖		101	108	84	86	92	115	93	79	86	109	68	93
邵女坪		68	75	75	79	63	65	66	71	87	77	59	71

结合图 3 的年可飞日变化趋势可知, 泸沽湖的可飞日曲线长期处于图的上半区域, 年际波动相对平缓, 2014~2024 年可飞日始终维持在 110 天以上。傣族园的曲线波动更明显, 2019 年可飞日达 152 天, 而 2018 年仅 76 天, 局地气象条件的年际变化较大。哈尼梯田的曲线多数年份处于图的下半区域, 且 2016~2018 年出现连续“低谷”(可飞日仅 43~44 天), 与该时段滇南持续强降水的气候特征高度吻合。2024 年多数景区曲线同步下降, 直观反映了当年云南春季降水偏多、大风天气频发对多景区可飞日的共同影响, 进一步证明可飞日数量受区域气象条件异常的影响显著。

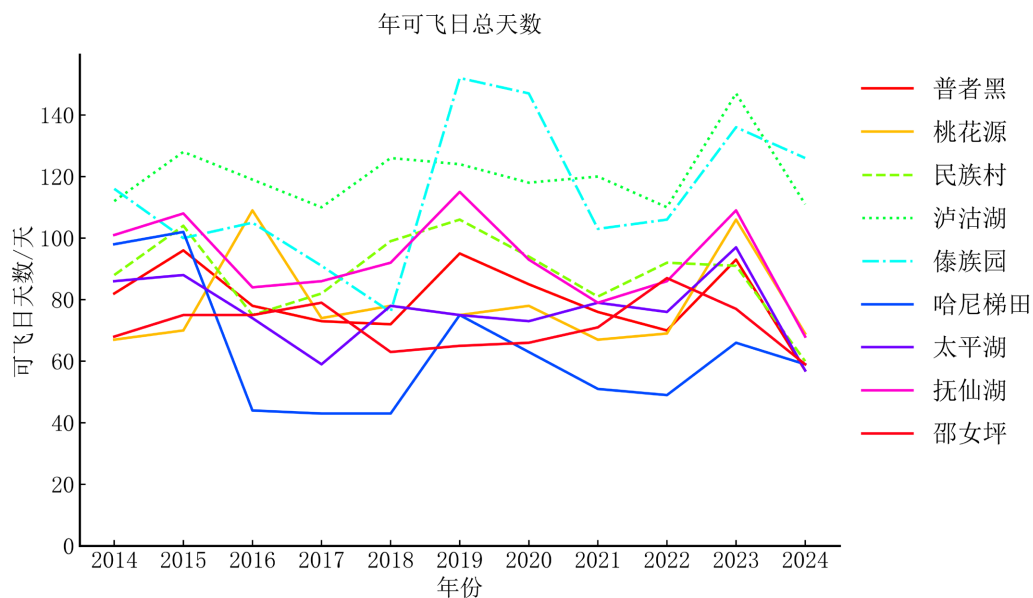


Figure 3. Variation trend of flyable days in scenic spots from 2014 to 2024
图 3. 各景区 2014~2024 年可飞日变化趋势

4.3. 可飞日时间分布特征

图 4 为 9 个景区 2014~2024 年四季平均可飞日分布，整体来看，受云南季风气候的影响，9 个景区的可飞日均呈现“冬春季多、夏秋季少”的共性特征。冬季可飞日占比为 24%~49%，春季可飞日占全年 33%~42%，冬春季是最佳飞行期，这一时期云南受冬季风控制，降水少、风速稳定、能见度高，低空湍流风险显著降低，仅滇西北高海拔区域存在强风影响。夏季可飞日占比则普遍低于 10%，如傣族园、泸沽湖夏季平均可飞日仅 2 天，主要原因是夏季风背景下易有强降水和局地对流，显著影响了可飞时段。

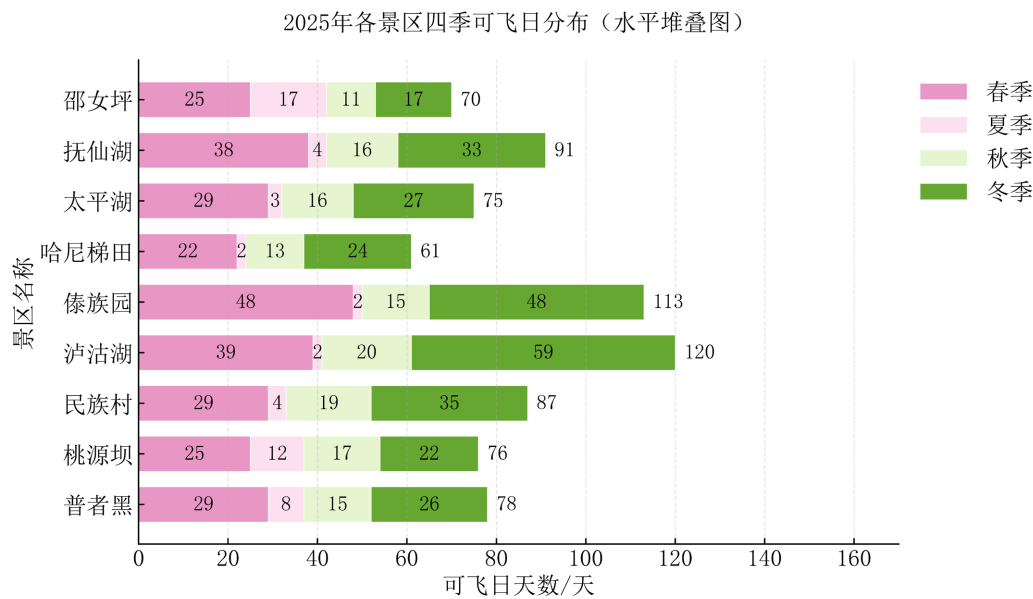


Figure 4. Distribution of average seasonal flyable days in 9 scenic spots from 2014 to 2024
图 4. 9 个景区 2014~2024 年四季平均可飞日分布

从不同可飞潜力梯队的差异来看,高潜力景区(如傣族园、泸沽湖等)的季节分布集中性最强,冬春两季可飞日合计占全年 80%以上,这类景区多位于湖盆或坝区,地形削弱了风速影响,冬春干季的气象特征高度适配热气球飞行,运营窗口期清晰明确。中潜力景区(如民族村、普者黑等)冬春季可飞日占比超 70%。而低潜力景区(如邵女坪、哈尼梯田等)的可飞日分布整体相对分散,如邵女坪四季可飞日占比均在 15%~36%之间,桃源坝四季占比在 15%~33%范围内,春冬占比略高,但各个季节平均可飞日均较少,难以形成稳定集中的运营窗口,需依赖短期气象预报灵活调整。总之,可飞日的季节分布本质上是云南季风气候和局地地形差异耦合作用的共同结果。

图 5 为 2014~2024 年 9 个景区的最长连续可飞日日数及其出现的月份。如图 5 所示,最长连续可飞日主要集中于冬季(12 月、1 月、2 月)、春季(3 月、4 月、5 月)及 11 月,仅极少数景区在 6 月、7 月出现最长连续可飞日,整体呈现“冬春两季为主、11 月补充、夏秋季极少”的规律。其中,泸沽湖、傣族园的长周期可飞窗口几乎完全锁定于上述时段,集中性特征尤为突出。哈尼梯田、邵女坪虽同样以冬春为主要连续可飞时段,但无明显高值集聚效应,再次证明可飞窗口分散化的特征,与之前的结果相一致。2024 年各景区最长连续可飞日天数均出现不同程度的减少,与之前结果类似。

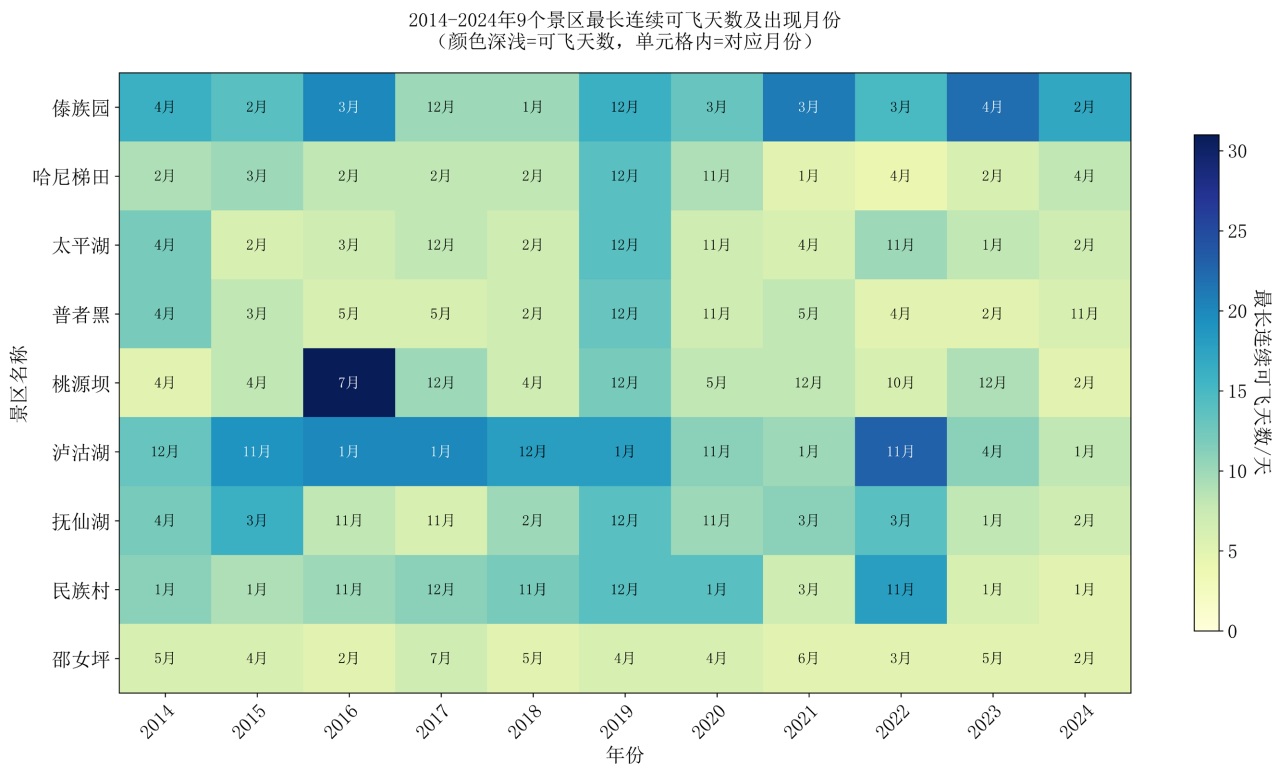


Figure 5. Maximum consecutive flyable days and their occurrence months in 9 scenic spots of Yunnan Province from 2014 to 2024 (the color depth represents the maximum consecutive flyable days, and the corresponding months are labeled in each cell)

图 5. 2014~2024 年云南省 9 个景区最长连续可飞天数及出现月份分布热力图(颜色深浅代表最长连续可飞天数, 单元格内标注的月份为最长连续可飞日出现的月份)

图 6 所示,泸沽湖、傣族园年均最长连续可飞日可达 16 天,抚仙湖、民族村、桃源坝约 11 天,哈尼梯田、邵女坪、太平湖、普者黑仅 6~8 天,景区间年均值差距最高达 10 天。这一结果与时段分布特征相一致(图 5),长周期可飞窗口集中性强的景区,更易形成稳定的长时段可飞条件,年均最长连续可飞日较高;而可飞时段分散的景区,难以积累长周期可飞窗口,年均值相对偏低。

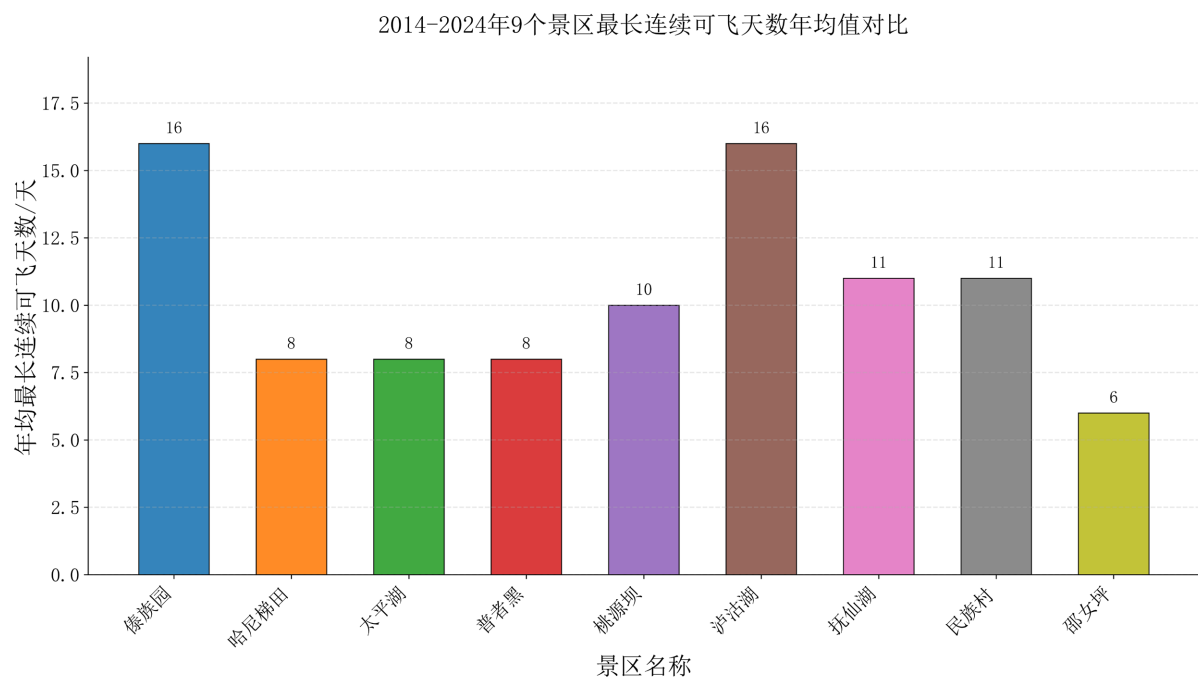


Figure 6. Comparison of annual average maximum consecutive flyable days in 9 scenic spots from 2014 to 2024
图 6. 2014~2024 年 9 个景区年均最长连续可飞天数对比

4.4. 云南 9 个景区热气球旅游气象适宜性综合评估

由表 4 可知，在准则层中，核心气象要素适配性权重最高(0.565)，占比超总权重的 50%，体现了“安全第一”的热气球旅游评估原则；可飞日数量权重次之(0.262)，保障了适宜飞行的规模基础；可飞时段稳定性(0.118)与时间连续性(0.055)权重相对较低，但仍为重要补充，确保评估的全面性。

进一步，针对方案层 9 个景区，分别在各准则下构建两两比较判断矩阵，计算各景区在各准则下的局部权重。将准则层权重与对应的局部权重相乘，得到各个景区在各准则下的加权得分，结果见表 4。

Table 4. Weight allocation of evaluation index system for hot air balloon tourism meteorological suitability of 9 scenic spots in Yunnan

表 4. 云南 9 个景区热气球旅游气象适宜性评估指标体系权重分配

准则层	准则层权重	方案层	局部权重	加权得分
可飞日数量	0.565	普者黑	0.103	0.058
		桃源坝	0.088	0.050
		民族村	0.120	0.068
		泸沽湖	0.190	0.108
		傣族园	0.163	0.092
		哈尼梯田	0.056	0.031
		太平湖	0.076	0.043
		抚仙湖	0.140	0.079
		邵女坪	0.065	0.037

续表

核心气象要素适配性	0.262	普者黑	0.088	0.023
		桃源坝	0.076	0.020
		民族村	0.103	0.027
		泸沽湖	0.163	0.043
		傣族园	0.190	0.050
		哈尼梯田	0.065	0.017
		太平湖	0.120	0.031
		抚仙湖	0.140	0.037
可飞时段稳定性	0.118	邵女坪	0.056	0.015
		普者黑	0.140	0.016
		桃源坝	0.088	0.010
		民族村	0.076	0.009
		泸沽湖	0.103	0.012
		傣族园	0.163	0.019
		哈尼梯田	0.190	0.022
		太平湖	0.065	0.008
时间连续性	0.055	抚仙湖	0.120	0.014
		邵女坪	0.056	0.007
		普者黑	0.065	0.004
		桃源坝	0.120	0.007
		民族村	0.103	0.006
		泸沽湖	0.163	0.009
		傣族园	0.190	0.011
		哈尼梯田	0.140	0.008
		太平湖	0.076	0.004
		抚仙湖	0.088	0.005
		邵女坪	0.056	0.003

Table 5. Comprehensive scores of meteorological suitability for hot air balloon tourism in 9 scenic spots of Yunnan

表 5. 云南 9 个景区热气球旅游气象适宜性综合得分

序号	景区	综合得分
1	傣族园	0.172
2	泸沽湖	0.171
3	抚仙湖	0.135
4	民族村	0.109
5	普者黑	0.101
6	桃源坝	0.087
7	太平湖	0.086
8	哈尼梯田	0.078
9	邵女坪	0.061

将 9 个景区对应的 4 项加权得分进行求和，即得到其相对于目标层的全局权重(气象适宜性综合得分)，结果如表 5 所示。由表 5 可知，傣族园和泸沽湖气象适宜性最优，综合得分最高，均约为 0.17 左右；邵女坪气象适宜性最差，综合得分仅为 0.061。

4.5. 云南热气球旅游气象适宜性等级区划

根据以上 9 个景区热气球旅游气象适宜性综合得分(表 5)，采用 K-means 聚类算法完成适宜性等级划分。利用肘部法确定了聚类算法的最佳簇数[15] (图 7)， $k = 3$ 时轮廓系数为 0.583 (>0.5)，说明聚类结果的类内紧凑性与类间分离度均处于良好水平。因此，将聚类数量设定为 3 类，对应“最适宜、中等适宜、一般适宜”三级业务分类，贴合热气球旅游运营实际需求。

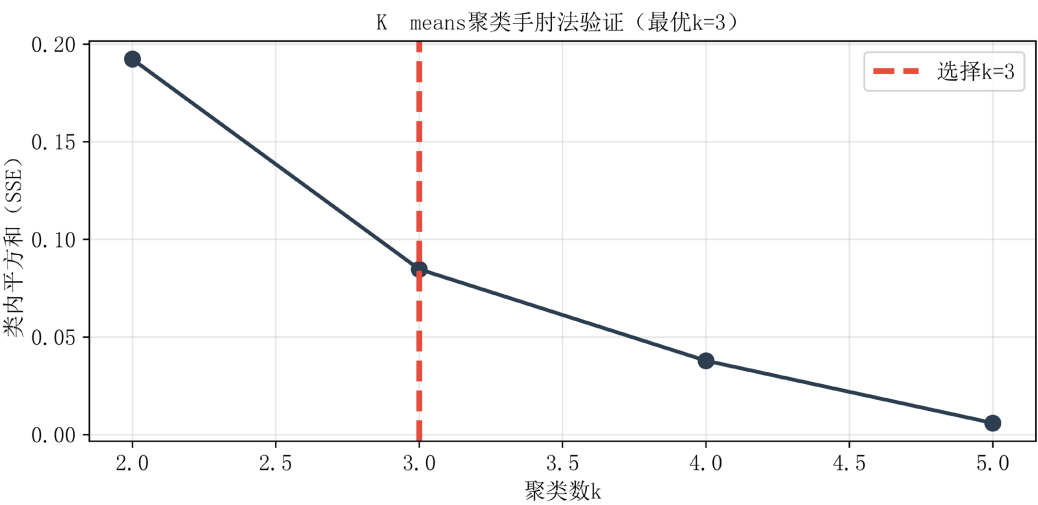


Figure 7. Relationship curve between clustering number k and sum of squared errors (SSE) within clusters
图 7. 聚类数 k 与类内平方和 SSE 的关系曲线

根据 K-means 聚类结果，将 9 个景区划分为三级适宜性等级，各等级特征如表 6 所示。最适宜的为泸沽湖、傣族园，气象条件最优，年均可飞日高于 110 天。中等适宜的为抚仙湖、云南民族村、普者黑，气象条件良好，年均可飞日高于 80 天。一般适宜的是桃源坝、哈尼梯田、太平湖、邵女坪，气象条件一般，可飞日数量年均低于 80 天。

Table 6. Clustering characteristics of meteorological suitability for hot air balloon tourism of 9 scenic spots in Yunnan (three clusters)

表 6. 云南 9 个景区热气球旅游气象适宜性聚类特征(3 类)

适宜度	景区	综合得分	综合得分区间	年均可飞日
一级(最适宜)	泸沽湖、傣族园	0.1716	0.1714~0.1718	≥110 天
二级(中等适宜)	抚仙湖、云南民族村、普者黑	0.1150	0.1012~0.1347	≥80 天
三级(一般适宜)	桃源坝、哈尼梯田、太平湖、邵女坪	0.0779	0.0607~0.0866	≤80 天

5. 结论与讨论

5.1. 主要结论

本研究以云南省 9 个热气球旅游潜力景区为对象，基于 2014~2024 年 ERA5 再分析气象数据，通过

空间降尺度、地形校正得到景区高分辨率气象数据,利用可飞日判定、综合评估及 K-means 聚类等方法,系统揭示了云南季风气候与地形耦合下热气球旅游气象适宜性的时空分布规律,完成了景区适宜性等级区划,主要结论如下:

1) 结合可飞日和最长连续可飞日的分析,可以发现,研究区内热气球旅游可飞条件受云南高原季风气候与地形共同控制,时空特征显著且两项指标表现高度一致。时间上,干季(11月~次年5月)为全域最优可飞时段,冬春两季可飞日充足、连续可飞窗口集中,夏秋季则受夏季风影响降水与对流旺盛,可飞条件整体受限,呈现出“冬春多、夏秋少”的稳定规律。

2) 空间上,湖盆、坝区地形的高潜力景区(如傣族园、泸沽湖)可飞日与连续可飞日集中度高、持续时间长,适宜规模化常态化运营;中潜力景区(如民族村、普者黑)运营弹性适中,低潜力景区(如邵女坪、哈尼梯田)受复杂地形影响可飞时段分散,仅适合灵活预约式运营。气象条件与地形格局共同决定了云南热气球可飞潜力的时空分布,可为云南热气球旅游的季节安排、景区选址及差异化运营提供科学依据。

3) 基于综合评估与 K-means 聚类,将 9 个景区划分为三级适宜性等级,即一级适宜区(泸沽湖、傣族园)气象条件最优,可飞日数量多且连续可飞性强;二级适宜区(抚仙湖、云南民族村、普者黑)气象条件良好,可飞日规模与稳定性兼具;三级适宜区(桃源坝、哈尼梯田、太平湖、邵女坪)气象条件一般,可飞日分散且连续飞行窗口短。

5.2. 讨论

本研究可为云南省相关景区开展热气球旅游发展提供基础气象条件分析和依据。一方面,有助于景区选址和优化,一级适宜区(泸沽湖、傣族园)可优先布局规模化热气球旅游项目,二级适宜区可适度发展,三级适宜区宜谨慎推进或聚焦短时体验产品。另一方面,为热气球旅游提供运营时段规划,泸沽湖、傣族园可聚焦冬春干季推出主题活动,哈尼梯田、邵女坪等景区可采用短期预约制,匹配分散的可飞时段。最后,是需建设热气球旅游配套的气象保障体系,需针对不同适宜性等级景区制定差异化气象监测方案,特别是二级、三级适宜区需强化短期气象预报与预警,降低天气突变带来的运营风险。

当然,需指出的是,本研究仅为面向气象条件的单维度适宜性评估,存在一定的局限性,未涉及空域政策、基础设施配套及土地使用限制等非气象因素约束。因此,其结果并不是唯一决策依据,实际落地还需结合旅游市场动态、安全监管要求、地形起降条件等多元素进行综合研判。同时,研究对象主要为云南省 4A、5A 级景区,未覆盖部分小众潜力景区(如乡村旅游点、生态度假区),结论的普适性有待拓展。此外,还可探索不同类型热气球(如小型观光型、大型载客型)的差异化气象阈值,进一步提升研究成果的实操性。这些问题,都有待于后续更加深入和完善的研究。

基金项目

云南大学大学生创新创业训练计划项目(20251045);国家自然科学基金地区科学基金项目(42565001)。

致 谢

感谢欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供 ERA5 再分析气象数据集,为本研究开展定量分析提供了关键数据支撑。

参考文献

- [1] 沈映春. 低空经济:“飞”出新赛道[J]. 人民论坛, 2024(8): 74-79.
- [2] 王璐. 低空经济助推西南边疆乡村振兴的对策研究[J]. 经营管理者, 2024(9): 74-75.
- [3] 梁津, 杨泓, 钟雪, 等. 低空飞行安全气象保障系统探究[J]. 中国交通信息化, 2024(S2): 176-179.

-
- [4] 彭启洋, 窦小东, 侯胜芳, 等. 云南航空气象安全风险等级评价研究[J]. 高原气象, 2025, 44(2): 535-545.
- [5] 叶毅, 陈仁良, 卫圆. 低空风切变对大型直升机飞行特性的影响[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 226-235.
- [6] Ernani, Y., Sukojo, B.M., Ratnasari, Y. and Anggoro, M.D. (2025) Analysis of Low-Level Wind Shear (LLWS) Triggers Using Radar and LIDAR Data at Soekarno-Hatta International Airport: Case Studies of 30 January and 20 February 2023. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1551**, Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1551/1/012032>
- [7] 高尔东. 基于产业链视阈的云南省低空旅游开发研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南财经大学, 2018.
- [8] 李世乾, 唐顺仙, 李睿, 等. 基于 ERA5 再分析资料的成都地区风廓线雷达小时风场数据质量评估[J]. 成都信息工程大学学报, 2025, 40(3): 368-375.
- [9] 江志伟. 基于深度学习的常规气象要素时空降尺度算法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [10] 王艳霞, 丁琨, 黄晓园, 等. 利用遥感瞬时温度场研究云南山地气温直减率[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 912-922.
- [11] 刘清洵. 热气球飞越泰山气象条件分析及预报[J]. 气象, 1998(12): 52-55.
- [12] 吴洪源. 浅谈低空风切变对起飞着陆的影响[EB/OL]. <https://news.carnoc.com/list/240/240505.html>, 2012-12-31.
- [13] Saaty, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- [14] 彭勇刚, 黄肖寒, 莫益江, 等. 基于层次分析法的农业气象灾害风险区划指标权重分析[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(1): 70-72.
- [15] 徐弋焜, 奚中阳. 基于 K-Means 聚类算法的高校学情质量监控工具研发和应用[J]. 信息与电脑, 2025, 37(12): 48-50.