DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2023. 06. 017

基于 FY-4A 和气象条件的梵净山 云海识别及特征分析

李光一1, 田鹏举1, 陈远航2, 谷晓平1, 段莹1, 廖留峰1

1. 贵州省生态气象和卫星遥感中心,贵阳 550002; 2. 贵州楚云环保科技有限公司,贵阳 550081

摘要:探究云海的时间变化特征,能够为当地生态旅游以及经济发展提供科学参考.以梵净山为例,基于 FY-4A 的云顶高度产品获取了有效的云顶高度数据,并分别按不同的判别规则提取梵净山景区范围内的云海日与金顶周 边的可观赏性云海日,分析其季、月、时段的变化特征以及与温度和湿度的相关关系,并基于以上结果调取地面视 频监测资料开展验证工作.结果表明:①2020年梵净山出现云海的天数总计 85 d,月均7 d,其中在金顶周边可观 赏到的云海天数为 62 d,占云海总日数 72.9%,月均 5 d;② 无论是云海还是可观赏性云海,季节特征为"春秋多, 夏冬少",其中可观赏性云海主要集中在 2-4 月,凌晨4 点至上午8 点期间频率最高;③ 当相对湿度高且平均温度 较低时,云海形成的概率较高,当相对湿度过高或者平均温度过低时云海均不易形成.因此,山间冬末春初时节, 湿度增加,水汽充足,清晨与傍晚极易形成云海景观,是前往梵净山观赏云海的最佳时期.

关 键 词: FY-4A 卫星; 云海; 云顶高度; 气象条件; 梵净山
中图分类号: P49 文献标志码: A

文 章 编 号: 1673-9868(2023)06-0174-08

Identification of Cloud Sea of Mount Fanjing and Characteristic Analysis Based on FY-4A and Meteorological Conditions

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

LI Guangyi¹, TIAN Pengju¹, CHEN Yuanhang², GU Xiaoping¹, DUAN Ying¹, LIAO Liufeng¹

1. Guizhou Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Guiyang 550002, China;

2. Guizhou Chuyun Environmental Protection Technology, Guiyang 550081, China

Abstract: Exploring the tempol variation characteristics of Cloud Sea can provide scientific reference for local ecotourism and economic development. Taking Mount Fanjing as an example, This study uses Python

收稿日期: 2022-05-31

基金项目:贵州省高层次创新型人才项目(黔科合平台人才[2016]4026);中国气象局风云卫星应用先行计划项目(FY-APP-2021.0208);贵州省企业基金项目(QHLQLJ[2022]-01).

作者简介:李光一,硕士,工程师,主要从事生态遥感研究.

通信作者:廖留峰,高级工程师.

175

Sea days within the whole region of Mount Fanjing scenic area and the viewable Cloud Sea days around Jinding according to different procedures. The variation characteristics of Cloud Sea in different seasons, months, and time periods, as well as correlation with the main meteorological elements were analyzed and verified based on the ground video monitoring data. The results show that: ① In 2020, the number of Cloud Sea day was 85, with average 7 days per month. Among which, the number of Cloud Sea days a-round Jinding was 62, accounting for 72.9% of the total Cloud Sea days, with average 5 days per month. ② No matter it is a Cloud Sea or a viewable Cloud Sea, the seasonal characteristics were realized as "more occurred in spring and autumn, less occurred in summer and winter". The viewable Cloud Sea were mainly appeared from February to April, with the highest frequency from 4:00 am to 8:00 am. ③ Under the higher relative humidity and the lower average temperature, the probability of Cloud Sea appearing is higher. When the relative humidity was very high or the average temperature is very low, the Cloud Sea is not easy to form. Therefore, in the late winter and early spring in the mountains, with the suitable humidity and the sufficient water vapor, it is easy to form viewable Cloud Sea in the early morning and evening, which is the best time to visit Mount Fanjing to enjoy the beautiful view.

Key words: FY-4A satellite; Cloud Sea; cloud top height; meteorological conditions; Mount Fanjing

生态旅游是由世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)特别顾问、 墨西哥专家 Ceballos-Lascurain 在 20 世纪 80 年代初首次提出^[1],它在赋予自然保护区生态系统经济价值 的同时,还为游客提供了强大的自然体验感^[2].于是,诸多学者基于气候资料与历史气象数据对山地旅游 区、生态旅游区等进行了旅游气候资源评估^[3-4].近年来,云海、日出、夕阳等天象景观成为了游客热衷的 打卡项目之一.由于缺乏准确的云海景观预报,游客势必会为守候云海奇观耗费大量的经济成本和时间成 本,故做好生态旅游气象服务对旅游业发展具有十分重要的实际意义.吴有训等^[5]通过气象站定时定地观 测,记录黄山云顶信息,分析了黄山云海的时空分布特征,发现云海出现前一日或者当日降水概率较高, 且 40 年期间出现概率呈减少趋势,这与全球气温升高、暖冬等气候现象有关.邓承之等^[6]以重庆黑山谷云 海为例开展了云海景观的天气学分析和数值模拟,得出 WRF模式和水物质法对多层云类和低云类云海具 有一定预报能力.乔舒婷等^[7]根据华山气象站高山气象观测资料,利用统计方法分析了华山云海 30 年的 时间变化特征以及与气象条件的关系,得出春季云海出现频次最少,秋季最多,且相对湿度较大更有利于 云海形成的结论.此外,诸多研究^[8-11]仅依托地面观测数据开展云海特征分析,不仅耗费人力和时间,且其 数据来源单一,统计原理简单,研究结果会受到主观因素判断的影响.

目前遥感技术在云检测方面已发展成熟^[12],风云二号、风云四号卫星的相继发射,也使得三维大气 在静止轨道上实现了立体监测.Lee 等^[13]研究了基于 FY-2E 和 Himawari-8 卫星同时观测云顶高度的提 取算法,且已有研究表明,FY-2E 卫星数据对层积云/高积云具有较好识别能力^[14-15].付炳秀等^[16]根据 丹霞景区特性,利用气象常规资料与 FY-2E 云分类数据,将层积云或高积云作层积云辨识处理,基于低 云面积百分比来定义云海日.然而,FY-2E 卫星于 2019 年退出了业务运行.2016 年风云四号 A 星的成 功发射,为我国气象和灾害监测提供了预报、预警服务,其发布的数据产品包括大气、云、降水、闪电等 23 种.许多学者基于 FY-4A 卫星反演了云顶高度信息^[17],并与其他卫星数据反演结果进行了比较与评 估,研究发现随着云光学厚度的增加,FY-4A 反演云顶高度的误差逐渐减小^[18-19].张永宏等^[20]利用 FY-4A 数据提出了一种多时相、多通道阈值组合的云检测方法,验证了云相态检测的合理性,纪丞等^[21]基 于 FY-4A 数据,利用台风带来的强天气过程设计了一种自适应阈值对流云提取算法,可为风云数据在 云检测方面提供重要支撑. 作为世界自然遗产之一的梵净山,海拔 450~2563 m(图1),是云贵高原向湘西丘 陵过渡斜坡上的第一高峰,梵净山金顶又称 红云金顶,海拔2336 m,因其晨间常见红 云瑞气环绕,故得其名.本研究充分利用风 云卫星数据,多元化信息来源,并基于地面 气象观测资料,以梵净山为例开展天地一体 化的云海特征研究,不仅具有强大的实际需 求和应用价值,也可为当地生态旅游的可持 续发展提供科学可靠的服务依据.

1 数据与方法

1.1 数据来源

风云四号卫星是我国第二代静止轨道 气象卫星,将接替第一代静止轨道气象卫

星一风云二号,确保我国静止轨道气象卫星观测业务的连续、稳定.风云四号第一颗星即 FY-4A,为科研 试验卫星,于 2016 年 12 月 11 日发射.风云四号卫星通过对云、云系、大气温湿度三维空间结构、下垫面 物理状态属性的监测,全面提高对天气、环境、灾害的监测能力,为天气预报、环境监测、国防军事保障提 供高精度的产品和服务.FY-4A 提供了 32 种定量产品,包括云和大气产品、地表类产品、天气产品、辐射 产品等.本研究选取北京时间 2020 年 1 月 1 日 00 点 00 分至 2020 年 12 月 31 日 23 点 59 分 FY-4A 云顶高 度(Cloud Top Height, CTH)产品作为主要数据(FY4A_AGRI_L2_CTH),传感器为多通道扫描成像辐射 计,时间分辨率为 15,45,60 min 不等,空间分辨率为 4 km.数据来自国家卫星气象中心官网,共计 14 485 条数据(NC 格式).下载完成后批量换算为北京时间,并结合地理位置查找表文件(Geographic Lookup Table,GTL)和交互式数据语言(Interactive Data Language, IDL)构建算法,对全圆盘数据进行了重投影 (CGS_WGS_1984)、几何校正、格式转换等预处理工作.

先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, ASTER GDEM)是美国航空航天局 NASA 和日本经 济产业省联合发布的全球数字高程数据产品,ASTER GDEM 30M 数据是根据 NASA 新一代对地观测卫 星 TERRA 的观测结果完成,数据水平精度 1 s(约 30 m,置信度 95%),数据来自于地理空间数据云官网, 统一投影坐标系为 CGS_WGS_1984,并提取梵净山高程数据.高分辨率可见光卫星影像来自 Google Earth,空间分辨率约 0.26 m. 温度与相对湿度数据均来自梵净山自动观测气象站,该自动观测气象站位 于梵净山景区,获取逐小时的气象要素数据.

1.2 云海识别方法

1.2.1 云海出现时间提取

对影像进行批量预处理后抽样检查发现,受空气质量影响,研究区域内某些时刻的风云影像存在大部分 Value 值为空的情况,因此需对此类影像予以剔除,避免对计算结果产生影响.通过 DEM 数据可知,梵净山最高峰海拔可达 2 563 m,同时结合云海现象的定义,在一定的条件下云顶高度低于山顶高度且达到一定面积范围时认为云海出现,即云顶高度低于山顶高度的云覆盖面积至少达到区域总面积的一半以上,判定规则如图 2 所示.图中,C_{CTH} 表示某时刻 FY-4A 影像中每个栅格的 Value 值,即云顶高度,如果该影像中存在某栅格值低于山顶高度 D_{DEM_{max},且满足该条件的栅格数 n 达到栅格总数 N 的 50%及以上,则记录影像时间并判定为云海日.}



http://xbbjb. swu. edu. cn

1.2.2 可观赏性云海日提取

可观赏性云海日即在云海日的基础上筛选出现在金顶周边的云海时间.根据卫星影像识别梵净山金顶 位置并进行标注,生成点位数据,并建立5km缓冲区,提取金顶周边可观赏性云海出现时间,具体流程如 图3所示.



图 2 云海日判定规则

图 3 可观赏性云海日判定规则

首先将初步处理的 FY4A_AGRI_L2_CTH 栅格影像通过 Raster to Point 工具将栅格数据转为点要素,并判断缓冲区范围内点要素的 Value 值即云顶高度 CTH 是否小于金顶高度(D_{DEM_{jd}} = 2 336 m),最后统计满足该条件的点数量 m,根据云海的定义,如果 m 大于缓冲区范围内总点数 M 的 50%及以上,也即云顶高度低于金顶高度的云覆盖面积达到缓冲区总面积的 50%以上则记录该影像时间,判定为可观赏性云海日.

1.2.3 云海时间特征分析

通过统计云海出现的时间得到云海季变化和月变化特征,为进一步细化可观赏性云海的时间特征,将 一天 24 h 分为 6 个时段,即 00:00-04:00,04:00-08:00,08:00-12:00,12:00-16:00,16:00-20:00 及 20:00-24:00,统计 365 d 各时段出现可观赏性云海的频率,得到云海观测的具体时间特征, 并结合温度和相对湿度等气候参数进行相关分析,为游客观赏云海以及生态旅游可持续发展提供科学 可靠的依据.

2 结果与分析

2.1 云海季节变化特征

如图 4 所示,2020 年梵净山云海日和可观赏性云海日具有明显的季节特征.2020 年云海日总计 85 d, 平均每季度出现云海 21 d,春季云海出现日数最多,总计 38 d,春季平均温度 3.00 ℃,相对其他季节温度 较低,但相对湿度达 92.4%,水汽充足,有利于云海形成.秋季虽相对湿度达到四季最高状态,但平均温 度也最高,达 14.87 ℃,由于气温过高不易于形成云海,故该季节云海日相对于春季有所减少.夏季相对 湿度低于 90.0%,平均温度高达 11.65 ℃,温度偏高且水汽不足,云海日较少,仅 18 d.进入冬季后,随着 平均温度的降低,相对湿度也低于 90.0%,云海日仅 10 d.

通过对比发现,梵净山可观赏性云海日季节特征与云海日保持一致,春秋多、夏冬少.可观赏性云海 全年总计出现日数为 62 d,占云海日的 72.9%,表明云海出现在金顶周边的频率较高.平均每季度出现可 观赏性云海 15 d,较云海日减少 6 d.水汽充足是云海形成的必备条件.春季相对湿度较高,温度适宜,且 可观赏性云海日占总云海日的 73.7%,为前往梵净山金顶观赏云海的最佳季节,而冬季相对湿度仅 88.1%,温度偏低,水汽不足,受气候条件限制,不易形成云海.



图 4 梵净山云海与气象条件的季节变化特征

2.2 云海月变化特征

一年中平均每月出现云海7d,但月际变化差异较大.如图5a所示,云海日最少月为7月,仅有1d,7 月相对湿度虽为97.2%,但正值夏季高温,平均温度高达16.18℃,形成云海的气候条件不足.云海日集 中在3月出现,有17d,占全年云海日总数的18.7%,3月冬末春初,平均温度5.40℃,气温回升,相对 湿度92.2%,气候条件适宜.从全年来看,云海日主要集中在1-4月,相对湿度均处于90.0%以上,平均 温度维持在3.00℃左右,平均每月出现云海日12d;5-8月虽相对湿度较高,但平均温度达到13.00℃ 以上,云海出现日数较少;9月平均温度降低,但相对湿度达到全年最高值98.3%,水汽充足,云海出现日 数大幅增加;10月随着相对湿度的降低,云海日数又逐渐减少;11月进入冬季,虽平均温度低至6.44℃, 但相对湿度仅77.6%,空气干燥,云海日仅有3d;12月相对湿度得到回升,达到96.8%,但平均温度低 至零下,云海出现日数较上月有所减少.

如图 5b 所示,全年可观赏性云海日月均 5 d,较云海日减少 2 d,其中 3 月仍为可观赏性云海日最多的 月份,有 12 d;7 月高温以及 12 月低温的气候条件使得云海日最少,仅有 1 d. 1-4 月可观赏性云海日均 达 5 d 以上;5-8 月可观赏性云海日均在 6 d 以下,前往梵净山观赏到云海的概率较小.9 月相对湿度最 大,为 98.3%,气候湿润,平均温度较 5-8 月有所降低,水汽充足,可观赏性云海日增至 10 d,随后进入 冬季,金顶周边每月出现云海日数低至 3 d 以下.





2.3 可观赏性云海时变化特征

有学者研究发现,云海最常见于冬末春初,山间多雾,昼夜温差大,清晨与傍晚时分极易形成云海^[10,15].因此,本研究统计一年中各时段出现可观赏性云海的频率,如图6所示,梵净山可观赏性云海出

现在凌晨4点至上午8点频率最高,为29.7%,结合图7的温度和湿度来看,该时段相对湿度较高,平均可达92.7%,平均温度7.70℃,而中午12点至下午4点时段湿度低于90.0%,且温度最高,水汽不足, 全年可观赏性云海出现频率仅有5.19%.下午4点以后随着气温降低,温差增大,相对湿度升高,可观赏 性云海出现频率又逐渐升高.



图 7 梵净山可观赏性云海月变化特征

通过分析可观赏性云海的季变化、月变化、时段变化与气温和湿度的关系可以发现,当相对湿度高且 平均温度较低时云海形成的概率较高;当相对湿度不变或升高,平均温度也随之升高时,云海形成概率降 低;当相对湿度较低,无论平均温度如何变化,云海都不易形成.因此,相对湿度对云海出现具有决定性作 用,而平均温度的变化则进一步影响着云海出现的概率,二者相互牵制,且同时处于某个区间状态时才易 满足云海形成条件(表 1).

相对湿度变化	平均温度变化	云海出现概率
升高	降低	大
升高	升高	小
降低	降低	极小
降低	升高	极小

2.4 地面资料结果验证

根据可观赏性云海日识别结果,选取相应时间调取地面监测资料进行验证,结果如表2所示.

表 2 地面验证结果

月份	遥感监测天数/d	地面监测天数/d	准确率/%
1月	5	4	80
2 月	11	7	64
3 月	12	7	58
4 月	7	5	71
5 月	3	2	67
6 月	3	0	0
7月	1	1	100
8 月	5	4	80
9月	10	6	60
10 月	2	2	100
11 月	2	1	50
12 月	1	1	100
总计	62	40	69

7月、10月、12月可观赏性云海出现频次较低,准确率最高,而2-4月为可观赏性云海出现的高频时 节,但卫星监测的准确率反而较低,监测结果不仅受该时期风云数据质量的影响,而且初春时期山顶容易 多雾,通过地面监测资料的人工判别相对困难,因此精确度不高.全年遥感监测可观赏性云海日为62d, 通过地面验证,其中有40d实际出现,准确率接近70%,因此该结果在一定程度上仍然可信.

3 讨论

FY-4A 云顶高度产品空间分辨率相对较低,根据第二次全国土地调查数据,梵净山自然保护区实测 面积 4.341 1 万 hm²,仅涵盖风云影像约 30 个网格,在提取梵净山影像时,影像边界容易缺失,使得部 分边界范围无数据. 受风云数据质量影像,在数据预处理过程中,如果空值栅格超过栅格总数的 30%, 则剔除该景影像,不纳入云海日计算,此处理过程极易剔除掉实际生成云海的时间,势必对研究结果产 生影响.在结果验证过程中,由于梵净山云海监测仪器设在金顶附近,且摄像角度固定,历史资料无法 实现 360°实时旋转,仅能查看到摄影机所摄区域范围,而摄影机视线盲区是否出现云海无法得知,为验 证工作带来了一定局限性. 同时,山顶夜间容易多雾,在视频资料中受雾影响,无法清楚辨析云与雾, 因此对云海判别也会带来一定误差.

但是,在云海变化特点的相关研究中,许多学者仅根据当地的实测资料进行时间特征分析,而本研究 在地面实测数据的基础上,利用了 FY-4A 云顶高度产品提取云海日并进行了地面资料结果验证.此外,还 引入了平均温度和相对湿度两个气象参数,从宏观尺度上研究了云海出现的季、月、时变化特征,其结果 具有一定的可信度.

4 结论

云海的出现必须达到一定的气候条件,水汽充足是其中的条件之一,而梵净山山顶气候千变万化,云海更是变幻莫测.2020年梵净山出现云海的天数总计 85 d,月均 7 d,其中金顶周边可观赏到的云海天数为 62 d,占云海总日数 72.9%,月均 5 d,即出现云海后约 70%概率能够在金顶、蘑菇石附近肉眼观赏到云海.根据梵净山山顶的气候特征,冬季温度偏低,冰雪覆盖,不易达到云海形成的气候条件.冬末春初时节,气温回升,湿度增加,水汽充足,昼夜温差增大,山间极易形成云海景观,一年中可观赏性云海主要集中在 2-4 月,凌晨 4 点至上午 8 点期间频率最高,是梵净山景区观赏到云海景观概率最大的时期.利用遥感技术从卫星视角识别云海,分析全年的云海日变化特征,不仅能够充分利用风云数据的多种云信息产品掌握云海出现的时间规律,为梵净山生态旅游提供科学可靠的服务依据,还能够为当地气候资源的合理开发利用提供决策服务,助力地方政府推动生态旅游城市发展.

致谢:铜仁市气象局相关工作人员为本研究提供了帮助,协助处理了梵净山视频监测资料,并提供了 重要的经验信息,特此感谢!

参考文献:

- [1] 钟林生,马向远,曾瑜皙.中国生态旅游研究进展与展望[J].地理科学进展,2016,35(6):679-690.
- [2] DRUMM A, MOORE A, SOLES A, et al. Ecotourism development a manual for conservation planners and managers [M]. Virginia: The Nature Conservancy Worldwide Office, 2005; 3-4.
- [3] 刘幸运,张天宇,武哲宇,等.重庆巫山旅游气候资源评估[J].西南师范大学学报(自然科学版),2018,43(5): 86-94.

- [4] 刘俸霞,何佳玥,叶钊,等.重庆万盛黑山谷生态旅游气候资源评价 [J].西南师范大学学报(自然科学版),2021, 46(10):68-77.
- [5] 吴有训,杨保桂,王克强,等.黄山云海的天气气候分析[J].气象科学,2005,25(1):97-104.
- [6] 邓承之,周国兵,韩潇,等.重庆黑山谷云海景观气象特征研究 [J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(5): 169-177.
- [7] 乔舒婷,达勇,曹慧萍.华山云海的时间变化及其气象条件分析 [J].陕西气象, 2016(6): 27-30.
- [8] 黄京平,王璇,吴文心. 三清山云海的气候特征与气象因子的关系 [J]. 江西科学, 2019, 37(5): 707-709.
- [9] 单权,冯国标,梁晓妮. 雁荡山云海的时空变化特征及其与气象因子的关系 [J]. 浙江气象,2014,35(2):34-37.
- [10] 肖雯, 刘春, 汪如良, 等. 2005-2015 年庐山云海时间变化特征及气象条件分析 [J]. 气象科学, 2020, 40(6): 859-867. [11] 帅川. 井冈山冬季典型云海天气分析 [J]. 中国高新科技, 2021(18): 113-114.
- [12] 米雪婷,孙林,韦晶,等. 基于多时相遥感数据的云阴影检测算法 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2016, 35(2):64-72.
- [13] LEE J, SHIN D B, CHUNG C Y, et al. A Cloud Top-Height Retrieval Algorithm Using Simultaneous Observations from the Himawari-8 and FY-2E Satellites [J]. Remote Sensing, 2020, 12(12): 1953-1964.
- [14] 胡禹贤,陈刚毅,闵文彬.风云二号卫星云分类产品与信息数字化云分类对比[J].成都信息工程学院学报,2014, 29(S1):103-107.
- [15] 杨牧田,金莲姬.利用黄山地区地基观测对 FY-2E 云分类的检验和验证 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(36): 5-14.
- [16] 付炳秀, 赖燕冰, 王文星. 丹霞山云海气象特征分析及其预报初探 [J]. 农业与技术, 2019, 39(15): 137-140.
- [17] 董焱, 鲍艳松, 许丹, 等. 基于 FY4A-AGRI 反演东北地区云顶高度 [J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(6): 8-20, 35.
- [18] TAN Z H, MA S, ZHAO X B, et al. Evaluation of Cloud Top Height Retrievals from China's Next-Generation Geostationary Meteorological Satellite FY-4A [J]. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(3): 553-562.
- [19] LIU B, HUO J, LYU D R, et al. Assessment of FY-4A and Himawari-8 Cloud Top Height Retrieval through Comparison with Ground-Based Millimeter Radar at Sites in Tibet and Beijing [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(8): 1334-1350.
- [20] 张永宏,杨晨阳,陶润喆,等. 基于 FY-4A 数据的青藏高原多时相云检测方法 [J]. 遥感技术与应用,2020,35(2): 389-398.
- [21] 纪丞,曾燕,邱新法,等. 基于 FY-4A 的一种自适应阈值对流云提取算法 [J]. 气象科学, 2021, 41(3): 398-403.

责任编辑 包颖

崔玉洁