

董良森,范娇,张正国,等.广西空中云水综合分析评估系统功能设计与业务实现[J].气象研究与应用,2022,43(3):110-114.
Dong Liangmiao,Fan Jiao,Zhang Zhengguo,et al. Function design and service realization of the cloud water comprehensive analysis, evaluation system in Guangxi[J].Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(3):110-114.

广西空中云水综合分析评估系统功能设计与业务实现

董良森¹, 范 娇¹, 张正国², 詹莹玉², 韦增岸², 李林红²

(1.广西壮族自治区气象台, 南宁 530022; 2.广西壮族自治区人工影响天气办公室, 南宁 530022)

摘要: 基于 ERA5 再分析资料及 CMADaaS 高时空分辨率降水数据作为评估数据源, 替代研究型 Cloudsat 数据集, 并遵循经纬度线上边界点成对设置原则, 以解决小区域分析结果不稳定现象, 应用多进程并行计算技术满足分析评估实时化、可视化要求; 用雨量反算法应对最新 ERA5 资料上线时间滞后难题, 探讨将分析研究型 CWR-MEM 云水资源评估方法落地为可实时业务应用的广西云水资源分析评估平台的思路和途径。结果表明, 系统运行稳定高效, 分析结果与国家指导区域云水分布特征基本吻合, 有助于合理规划空中云水资源开发利用、提升人工影响天气业务能力水平。

关键词: 水凝物; 云水资源; 降水效率; 三维云场; 监测评估

中图分类号: P49

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.3.20

引言

大气中的水物质包括气态的水汽, 以及液、固态形式存在的水凝物; 尽管定量分析表明后者比前者要小 1~2 个数量级^[1], 却是人类目前能够施加有限干预的主要对象。因此, 以云为主要载体的水凝物含量及其变化特征也就成了当前“空中水资源”分析研究的重点。而对目前已实现常态化作业的全国各级人工影响天气业务单位而言, 科学评估和实时监测空中云水的分布变化特征, 是提升人影业务服务能力水平的核心工作之一^[2-3], 相关定量分析和监测服务产品在各级业务服务单位中都有非常迫切的应用需求。过去由于观测资料和评估方法等局限, 学者主要通过分析水汽及地面降水变化来间接评估特定区域范围内的空中云水资源分布状况^[4-11]。从 2010 年起, 中国气象科学研究院结合国家需求, 依托数值模式再分析资料和三维云场监测诊断技术, 以云水、云冰等“空中水凝物”为直接研究对象构建出新一代云水资源监测评估方案(CWR-MEM)^[1,12], 提供了一条量化评估空中云水含量的新思路, 形成《云水资源评

估技术指南(2016 版)》(以下简称《指南》)供各级人影业务单位参考使用。由于该方案基于实验室研究手段, 对云资料的获取及处理技术要求高, 且资料时空分辨率难以刻画局地云水分布差异, 一直以来未能在基层业务单位推广使用。2018 年开始, 广西新一代人工影响天气业务平台研发团队结合目标需求, 在 CWR-MEM 方案基础上融合采用最新数值模式再分析资料, 设计出一套稳定高效业务评估流程, 填补了以“空中水凝物”为研究对象的业务化云水资源综合分析评估系统空白。本文就平台功能设计及关键技术实现作一概括介绍。

1 数据来源和处理策略

1.1 资料来源

基础数据的长期稳定保障是构建业务化系统的关键; 《指南》基于 Cloudsat 卫星观测资料的云场分析诊断方案存在着资料无法持续保障、数据处理难度高、基层业务单位直接应用转化困难等问题, 必须找到可靠易用的数据源加以替代。

收稿日期: 2022-02-26

基金项目: 广西区域空中云水资源精细化分析评估技术及关键特征参量优化研究(桂气科 2019Z02)

作者简介: 董良森(1973—), 女, 正研级高级工程师, 从事天气预报及相关研究工作。E-mail: nn172172@163.com

(1) ERA5 大气再分析资料

“大气再分析(atmospheric reanalysis)”资料是利用数值天气模式的数据同化技术(4D-Var data assimilation method), 将来自世界各地的各种观测仪器和观测源、不同误差标准、不同时空分辨率的大气观测资料融入到遵循基本物理定律约束的动力模式中, 依据严格数学理论在实际观测值与模式解之间找到最优解。由于不受计算时效限制, 生成再分析资料时可以用更多时间收集和整理各种观测数据, 允许吸收原始观测数据的标定或改进版本, 能够形成全球统一完整、标准水平一致、各观测要素之间物理关系协调匹配的高质量资料数据集, 在气象科学研究和业务系统构建过程中能够起到有足够客观依据的基础数据支撑作用。

系统以最新 ECMWF 第五代全球气候模式再分析大气资料(ERA5)^[13]作为核心数据源, 水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (ERA5-Land data)/ $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (ERA5 data on single levels、ERA5 data on pressure levels)、垂直分辨率为 37 层、时间分辨率为 1h。对照《指南》方案需求, ERA5 完整提供了各高度层和各经纬度格点的云水关键特征量(其中, 水凝物总量应为 ERA5 空中雨水 rain_water、空中雪水 snow_water、云液水 cloud_liquid_water、云冰水 cloud_ice_water 这 4 个要素分量之和), 有效解决了评估工作最为棘手的数据来源问题。

(2) 实测降水资料

ERA5 虽提供了 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率的精细化陆面再分析降水量资料(ERA5-Land data), 但对比检验后发现, 该数据集给出的降水落区分布与实况差别较大, 且计算出来的区域降水量偏高(广西区域验证结果较地面气象站实测年平均值偏大可达 50%), 导致水凝物降水效率、水物质更新周期等关键云水特征参量评估结果可信度不高。因此, 系统改用“天擎”大数据云平台(CMADaaS)经过质控的国家气象台站实测数据集作为基础降水数据源, 资料序列长度从 2000 年起逐日至今; 特别是 CMADaaS 数据集从 2010 年起逐步纳入各省区建设的区域加密自动气象站观测资料, 仅广西周边区域 8×9 个经纬度格点面积内, 至少有 1000 多个测站资料可供使用(近年更多达近 4000 个), 显著提高了降水的地域匹配精度, 确保了地市级区域云水参量分析评估结果的稳定可靠性。

1.2 物理量计算方案

系统严格遵照《指南》技术方案来实现各相关物理量的评估计算^[1,12], 每次评估统计均输出包括水物质总量、水物质更新周期和水物质转换效率等共计三大类、十个重要云水特征参量, 分别是: 水汽总量 GQv、水凝物总量 GQh、降水总量 GR、云水总量 GCWR、水汽更新周期 Tv、水凝物更新周期 Th、水汽凝结效率 P、水汽降水效率 Ev、水凝物降水效率 Eh 和总水物质降水效率 Em。

其中, 对水凝物总量的估算沿用《指南》算法, 即首先利用公式(1)判断凝结与蒸发之间的差值, 公式如下:

$$(\text{凝结}-\text{蒸发}) = \text{水凝物终值} + \text{水凝物输出} + \text{降水} - \text{水凝物初值} - \text{水凝物输入} \quad (1)$$

当凝结量大于蒸发量时, 定义该差值即为该格点柱单位时间内的凝结量, 此时采用公式(2)计算水凝物总量:

$$\text{水凝物总量 GQh} = \text{水凝物初值} + \text{水凝物输入} + \text{凝结} \quad (2)$$

反之凝结量小于蒸发量时, 定义该差值即为该格点柱单位时间内的蒸发量, 此时采用公式(3)计算水凝物总量:

$$\text{水凝物总量 GQh} = \text{水凝物终值} + \text{水凝物输出} + \text{降水} + \text{蒸发} \quad (3)$$

1.3 源数据处理策略

(1) 下载 ERA5 自 2000 年以来广西区域 ($20^\circ \sim 27^\circ \text{N}$, $104^\circ \sim 112.5^\circ \text{E}$) 逐月、逐日的相关再分析数据产品, 归类存储到系统后台数据目录下, 随时供系统评估模块根据用户查询需要进行调用。通过在程序中引入 ECMWF Web API 客户端接口模块 cdsapi 并设定好需下载的资料要素清单、区域经纬度范围和年月日时段参数, 资料准备工作可通过调用 retrieve() 函数批量化自动完成。

(2) 将离散化的 CMADaaS 气象观测站实测雨量按规定格点分辨率进行网格化, 即可形成满足云水参量计算需求的基础地面降水资料序列。站点雨量插值到格点采用克里金(Kriging)算法^[14,15](这也是广西气象台进行气象要素等值面分析的主要业务算法之一), 对比分析表明其输出结果, 比起线性插值(Linear)、样条插值(Spline)、反距离权重(IDW)等其它插值算法更能体现出降水的局地性特征, 这对地市级辖区云水分布特征差别的精细刻画非常关键。

sufer 软件的 GridData 函数(指定 Algorithm 参数为 srlKriging 选项)可用来完成站点雨量插值到格

点;鉴于 Kriging 算法在拟合物理量趋势面、给出格点估测值的过程中,有沿某个持续下降的趋势面方向输出负数值的可能,需要在执行完函数插值后再将所有负值格点重置为 0 值,处理才告完成。

2 核心分析评估模块细节设计与实现

云水分析评估所需的数据源问题一旦解决,剩下工作大部分可按《指南》计算公式对评估区域内的格点要素数据进行时间和空间积分计算以获得各种关键参量结果,具体过程不再赘述。以下主要讨论在《指南》中未明确列出,但在系统建设过程中需注意解决的细节问题。

2.1 评估区域的边界设定和处理

在云水特征参量统计分析过程中,边界格点输入、输出通量的时间积分占主要地位,其数值结果也比参量空间积分值大 1~2 个量级;正常情况下评估区域上-下边界与左-右边界的通量有一定的相互抵消作用(左入右出、下入上出);但若边界设定失衡,在某一个经纬度线上有流入没流出,将会造成显著的积分误差,这对小面积区域云水参量的最终计算结果影响巨大。为避免上述误差积累放大问题,必须遵循“任一条经纬度线上的边界点必须成对设置”原则来细心处理评估区域的边界格点:同一条经度线(或纬度线)上的区域内格点,若有一个左(上)边界,就必须设置一个右(下)边界与之相对应(同一经纬度上可设定不止一对边界格点)。

2.2 区域云水分布状况的可视化

针对各级人影业务单位对辖区内空中云水资源开展本地分析评估的业务应用需求,系统的功能设计目标是:依托 WebGIS 底层数据展示平台,建立覆盖广西全境的空中云水分布状况综合分析评估系统,能够按用户选定的任意时段实现对广西全区及 12 个地市辖区范围内空中云水量统计平均值、云水时空分布状况、空中水物质各重要特征量(水汽和水凝物总量、更新周期、降水效率等)的综合分析评估;可根据前期关键指标评估结果和最新气象观测(地面降水等)数据对区域内云水含量及分布状况进行临近时段评估;能够以等值线(量级色斑)图、表格、文件等方式输出统计分析和实时监测结果,为用户进一步制作相关分析评估产品提供便利。

参照 CWR-MEM 方案,云水特征参量值与评估区域的面积设定密切相关——区域划分不同,得到的评估结果就有差异;而且由于区域间输入、输出通

量部分会被重复计算,各子区域云水特征值的代数和也不等于合并后整个大区域的单独评估值。

为解决系统的数据可视化需求与评估结果因区域划定而异的矛盾,系统采用图形、表格同步展示的建设方式,其中,在图形化界面中绘制的是“单位面积”(即只包含有 1 个 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格点范围)区域的云水特征场分布状况(此时区域边界定义为计算格点与周边格点的交界处、边界风及相关边界要素值应为该网格与相邻网格的算术平均值,具体处理参见图 1),而广西全区及 12 个地市级特定评估区域的云水特征参量则以表格方式另外展示。

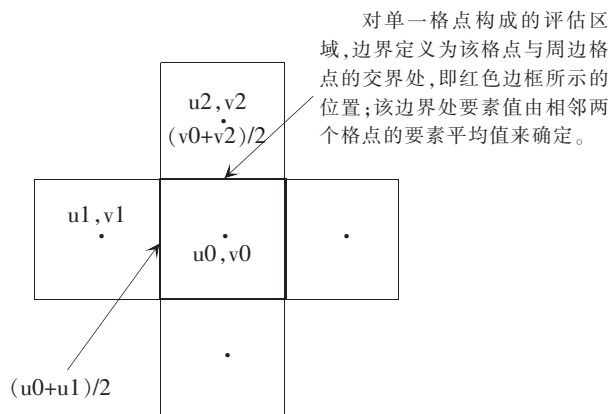


图 1 单位格点区域边界的 u、v 风处理示意图

每次用户评估查询处理结束后,系统首先将单位区域的评估结果以等值线色斑图的方式展示在主界面上,然后再将广西全境及 12 个地市级评估区域的云水特征参量数据更新到界面右侧的对应表格框中,各种评估结果可用图、表、文件等方式进行转储或打印输出,为后续进一步分发应用提供便利。

2.3 临近期云水分布状况分析评估功能的实现

鉴于最新 ERA5 再分析资料官网上线并提供给用户下载的时间比资料实测时间一般滞后 1~2 个月,对于实时业务所需的临近期(3 个月以内)空中云水分布状况不能直接用 CWR-MEM 方法给出,只能采用间接方式实现。将《指南》方案中的水凝物降水效率公式代入云水资源总量计算公式,得出:

$$\text{空中云水总量 GCWR} = \text{降水总量} \times ((1/\text{水凝物降水效率 } E_h) - 1) \quad (4)$$

这说明假定历史时段의 综合分析评估结果(降水效率 η)与相应区域最新时段(需实时监测时段)的相应特征参量大体一致,就可通过“水凝物-降水量-云水资源量”三者之间的比例关系,用即时可取的测站实况雨量来反推该区域空中云水分布状况。

基于上述原则, 模块先从 CMADaaS 数据库中统计出查询时间段内的测站降水总量, 并完成格点化处理; 然后结合用户最近一次对历史时段综合分析评估结果, 提取各区域的降水效率 η 等特征参量, 将其作为实时监测时段的对应特征参数近似值; 最后采用雨量反算法求解云水实时监控特征量, 并以图形图表方式予以展示。

2.4 模块业务性能优化

完成上述业务功能设定需进行大量的月、季、年长序列积分计算, 且在 WebGIS 平台上绘制广西单位面积区域云水特征分布场需要对广西境内总计近 1200 个网格点分别进行 CWR-MEM 评估计算, 给出每一个格点区域的特征参量值, 因此需独立评估的区域多达 1200 余个, 计算量极大; 而对一个综合分析平台而言, 用户执行查询操作后输出评估结果时间长短是系统能否具备良好应用体验、达到“业务可用”标准的关键。为提高运算效率, 程序采用多进程并行策略: 首先以评估区域、时段为输入参数构建相对独立的云水分析评估函数; 然后将不同时段及评估区域的分析评估函数分别放到进程池中, 以子进程方式同步并行执行, 其结果保存在中间数组内; 最后融合处理各分区域、分时段的处理结果, 合并成最终分析结果并输出到数据文件或文本图片产品中, 供前端界面提取和展示。

以 python 后台分析处理程序为例, 多进程并行代码段是:

```
-----
multiprocessing.freeze_support() #--- 在 windows 处理
环境下需加入该行代码以适应 Windows 操作系统的进程调
度机制; 在 linux 处理环境下则不需要此句。
pool = multiprocessing.Pool(processes=12) #--- 建一个
可容纳 12 个子进程并行执行的进程池
pool.apply_async(func=子评估函数, args=(参数, ...),
callback=返回值处理函数) # 根据评估需求, 构建独立的分
时段、分区域评估子进程, 抛入进程池中并行执行
pool.close() #--- 等待进程池中的全部子进程执行完毕
pool.join() #--- 合并处理各子进程结果, 输出最终结果
-----
```

实测表明, 在设置 12 个以上进程并行执行的条件下(目前主流双路 CPU 服务器物理核心数一般为 40~56 个, 完全满足该并行环境要求), 系统执行一次时间序列为 10a 左右的用户查询其评估结果输出时间可控制在 15min 内, 基本满足业务化应用需求。

3 结论与讨论

广西云水资源分析评估平台于 2020 年基本建成, 业务试运行结果表明, 系统运行稳定高效, 省级区域分析结果与《指南》全国评估数据中的区域云水分布特征基本吻合, 市县级分区域分析结果可精确刻画出广西区域云水资源的地域性和季节性特点^[17]。

综上所述, 将实验室研究型的 CWR-MEM 云水资源评估方法落地为可实时业务应用的广西云水资源分析评估平台, 其基本思路和做法是:

(1) 引入 ECMWF 第五代全球气候模式再分析大气资料中的云液水、云冰水等云水关键特征量可解决 CWR-MEM 方案评估数据来源的稳定更新问题; 从 CMADaaS 数据集获取区域自动气象站降水数据以替代 ERA5 的地面降水再分析资料, 可提高地面雨量分析的时空精准度, 确保市县级小区域云水参量分析评估结果的稳定可靠性。

(2) 遵循“经纬度线上边界点成对设置”原则来设定评估区域的边界格点位置及类型, 可避免评估结果因边界设定不匹配、输入输出相互失衡造成的显著误差。

(3) 实现评估数据的可视化须解决“单位面积”即单格点区域的云水分布特征量的全覆盖计算问题; 由此成百倍增加的积分运算量应通过程序的多进程并行设计来化解, 以确保用户在评估过程中有良好的应用体验。

(4) 在云水状况实时监控环节, 可采用“雨量反算法”以测站实况雨量来反演该区域近期空中云水分布状况、弥补最新 ERA5 再分析资料上线滞后问题。

由于在 CWR-MEM 方法中气柱内水物质的“凝结量”与“蒸发量”是一个与评估区域的水凝物输入、输出相关的粗估量, 既需要借助大量的通量积分运算才能判定其性质, 又难言合理准确。如何更加科学、有效地对其进行参数化, 是系统进一步提升评估效能的改进完善方向。另外, 针对 ERA5 地面降水等观测要素资料在广西区域存在的与实况降水分布差别较大等问题, 使用中国气象局最近发布的全球大气再分析(CRA-40)资料来解决云水资源分析评估系统的数据源问题, 也是将来进一步提升平台稳定性和科学性水平的一个可供参考的手段。

参考文献:

[1] 中国气象局. 云水资源评估技术指南 (2016 版)[Z].

- 2016.
- [2] 中国气象局. 人工影响天气“耕云”行动计划(2020–2022年)[Z].2019.
- [3] 国家发展改革委,中国气象局. 全国人工影响天气发展规划(2014–2020年)[Z].2014.
- [4] 潘留杰,张宏芳,周毓荃,等. 1979–2012年夏季黄土高原空中云水资源时空分布[J].中国沙漠,2015,35(2):456–463.
- [5] 张泽中,黄强,齐青青,等. 云水资源及其计算方法[J].水利学报,2007,(S1):428–431.
- [6] 李兴宇,郭学良,朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势[J].大气科学,2008,32(5):1094–1106.
- [7] 李玉林,吴万友,蔡定军.江西省云水资源特征分析[J].气象科技,2010,38(5):613–619.
- [8] 李江南,庞思敏.热带气旋云微物理过程的研究进展[J].气象研究与应用,2021,42(3):1–6.
- [9] 高沁,汪玲,李琼,等.湖南省不同作业期人工增雨的需求探析[J].气象研究与应用,2021,42(3):50–54.
- [10] 汪玲,韦增岸,程鹏,等.湖南人工增雨作业效果统计检验与分析[J].气象研究与应用,2019,40(3):85–89.
- [11] 郝巨飞,高俊喜,杨允凌,等.邢台市大气水汽及云水变化的降水前兆分析[J].气象研究与应用,2021,42(1):13–19.
- [12] 蔡森.中国空中云水资源和降水效率的评估研究[D].北京:中国气象科学研究院,2013.
- [13] 刘菊菊,游庆龙,周毓荃,等.基于 ERA–Interim 的中国云水量时空分布和变化趋势[J].高原气象,2018,37(6):1590–1604.
- [14] 戚晓明,陆桂华,吴志勇,等.三种点雨量插值方法的比较研究[J].中国农村水利水电,2007,(2):109–112.
- [15] 高歌,龚乐冰,赵珊珊,等.日降水量空间插值方法研究[J].应用气象学报,2007,18(5):732–736.
- [16] 常倬林,党张利,孙艳桥,等.基于 FY2G 卫星的宁夏空中云水资源特征研究[J].气象研究与应用,2022,43(1):47–52.
- [17] 张正国,简悦,李宇中,等.基于 ERA5 资料的广西地区云水资源评估[J].气象科技,2021,49(5):806–814.

Function design and service realization of the cloud water comprehensive analysis, evaluation system in Guangxi

Dong Liangmiao¹, Fan Jiao¹, Zhan Yingyu², Zhang Zhengguo², Wei Zhengan², Li Linhong²

(1. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China;

2. Guangxi Weather Modification Office, Nanning 530022, China)

Abstract: Using the stable and updated ERA5 reanalysis data and CMADaaS high spatial–temporal resolution precipitation data as the evaluation data source to replace the research CloudSat data, this paper follows the principle of paired setting of the boundary points on the longitude and latitude lines to solve the problem of unstable analysis results in small areas. Also, multi–process parallel computing technology is applied to meet the requirements of real–time and visualization of analysis and evaluation. Moreover, the rainfall inverse algorithm is used to deal with the time lag problem of the latest ERA5 data, and discuss the ideas and ways to implement the analytical research–oriented CWR–MEM cloud water resources assessment method into a Guangxi cloud water resource analysis and assessment platform that can be applied in real–time business. The results show that the system operates stably and efficiently, and the analysis results are basically consistent with the distribution characteristics of cloud water in the national guidance area, which is helpful to reasonably plan the development and utilization of cloud water resources in the air and improve the operational ability of weather modification.

Key words: hydrometeor, cloud water resources, precipitation efficiency, 3D cloud field, monitoring and evaluation