

张德杰,王雯慧,李春涵,等. 基于多源资料的山东省总云量时空变化特征[J]. 陕西气象,2025(5):33-40.

文章编号:1006-4354(2025)05-0033-08

基于多源资料的山东省总云量时空变化特征

张德杰^{1,2},王雯慧²,李春涵^{1,2},狄文丽³,韩慧敏⁴

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室,济南 250031;2. 淄博市气象局,山东淄博 255000;

3. 清徐县气象局,太原 030400;4. 南通市海门自然资源和规划局余东自然资源所,江苏南通 226100)

摘要:利用 1987—2016 年 CRA40、ERA5、JRA55 与 CFSR 四种再分析资料与 ISCCP 总云量数据,分析了山东省各产品总云量的空间分布特征及时间变化趋势,讨论了不同再分析产品总云量与 ISCCP 及地面观测数据的偏差特征。结果表明,山东省沿海和西南部是总云量高值区域,卫星反演总云量整体高于再分析产品。总云量最高值均出现在 6—8 月份,冬春季再分析产品总云量更接近于地面观测,而夏季 ISCCP 产品与地面观测总云量一致性更高。总云量与降水量存在明显的正相关,而温度升高一定程度上会抑制云的生成。1987—1996 年山东省年平均总云量下降超 4%,2007 年后总云量变化逐渐趋于平缓。山东省北部的总云量偏差较大,鲁中及鲁南地区的再分析资料与 ISCCP 云量偏差相较于其他地区偏小,ERA5 总云量整体更接近于地面观测。

关键词:总云量;时空分布特征;再分析资料

中图分类号:P426

文献标识码:A

云在地气系统的能量平衡、大气动力过程及水循环过程中起着重要作用,云量的时空分布特征及变化趋势研究在大气辐射传输、天气及气候变化、人工影响天气等领域有重要的意义^[1-3]。云量数据的准确性不仅可以提升降水预报、新能源发电的光伏调度等气象业务精度,还能为光合有效辐射估算、碳汇管理和灌溉优化等生态和水资源管理提供科学支撑。

学者们对云量的分布特征及变化趋势开展了一系列研究^[4-8]。Kaiser 等^[9]发现在 1951—1994 年间中国大部分地区总云量呈减小趋势,其中东北地区云量减小趋势最为明显。Zhao 等^[10]研究发现,长江三角洲地区的总云量和高云量夏季高冬季低,中云量则夏季低冬季高,低云量在一年中变化较小;这一地区总云量和高云量有减小的趋势,低云量在春夏两季有增大的趋势,而中云量基

本不变。王捷馨^[11]利用 ERA-Interim 资料对环渤海地区的总云量、低云中对流云量和非对流云量的空间分布特征及影响因素进行了分析,认为该地区云量分布有显著的季节和日变化。我国的云量观测方式由人工观测为主的定点定时观测转变为自动判识算法,这显著提高了我国云量资料的连续性^[12-13]。然而在观测过程中,大部分地面站都经历了几次迁站,对我国地面云量资料的连续性造成影响。随着观测资料越来越丰富,对最新云量资料进行对比评估进而了解不同资料的适用性非常必要^[14-17]。本文选取地面观测、卫星产品以及再分析资料对山东省总云量的时空分布特征及变化趋势进行了分析,对比了不同产品的总云量在山东省的差异性及相关性,为各产品在山东省的研究应用提供参考。

收稿日期:2025-02-08

作者简介:张德杰(1997—),男,汉族,山东潍坊人,硕士,助工,主要从事气象观测、再分析数据分析。

通信作者:王雯慧(1999—),女,汉族,山东威海人,硕士,助工,主要从事气象观测、雷达数据研究。

基金项目:淄博市气象局科学技术研究项目(2023zbqx04);山东省气象局科学技术研究项目(2023SDQN12)

1 数据与方法

本文选取 1987—2016 年的山东省及其周边 41 个地面观测站点(图 1)总云量、降水量数据,国际卫星云气候计划(ISCCP)的卫星反演总云量产品(空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)^[18-19]以及中国气象局的 CRA40(空间分辨率为 $0.34^{\circ} \times 0.34^{\circ}$),欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$),日本气象厅(JMA)的 JRA55(空间分辨率为 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$),美国环境预报中心(NCEP)的 CFSR(空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)四种再分析资料^[20-23]。总云量、降水量等要素的地面观测资料来源于中国气象数据网,经质量控制后筛选出与各资料时空匹配度较好的数据,采用双线性插值方法将站点观测数据与格点数据插值从而进行空间一致性转换。计算年平均、月平均总云量和各资料之间偏差(B),通过偏差分布的空间可视化进一步探讨山东省总云量的时空分布特征以及不同产品总云量在山东省的差异性及相关性特征;通过相关系数 R 对不同产品总云量与其他气象要素以及不同产品与地面观测总云量之间关系进行评价分析,计算公式如下。

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - o_i), \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{X}_i)][(o_i - \bar{O}_i)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}_i)^2 (o_i - \bar{O}_i)^2}}. \quad (2)$$

其中, n 是参与比较的总样本数; x_i 为数据源; o_i 为要比较数据; $\bar{X}_i$ 表示数据源的平均值; $\bar{O}_i$ 表示要比较数据的平均值。

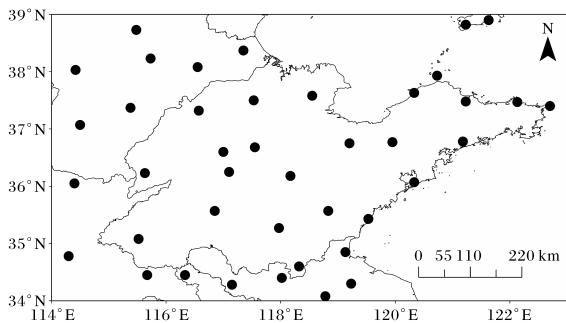


图 1 研究区 41 个观测站点分布图

(审图号为 GS(2017)3320,下同)

2 空间分布特征

图 2 为 1987—2016 年不同产品总云量在山东省的空间分布,ISCCP 总云量相较于再分析资料整体较高,全省平均总云量在 40% 以上;CRA40 总云量在山东省整体分布较均匀,在鲁中及东部沿海地区略高,该地区最高值达到 40% 以上。沿海地区水汽充足,当海面平流雾随东南风登陆时会形成低层层云,也会导致沿海地区总云量高于内陆;当东南季风携带的暖湿气流遇山地抬升,绝热冷却促进层积云或对流云生成,导致泰安、临沂等地云量显著高于周边平原。ERA5 和 CFSR 总云量的空间分布特征明显,表现出南多北少的特征,比 ISCCP 产品稍低,且二者总云量整体高于 CRA40 和 JRA55。在山东省西北部如德州和滨州地区为总云量低值区域,这是由于鲁西北平原处于鲁中山地背风区,下沉气流抑制云的发展;从地面站点数据来看,全省总云量分布不均,在东部沿海和西南部出现云量高值区域,在渤海湾周边相较于其他地区总云量偏低。

3 时间变化特征

3.1 月平均变化

不同产品总云量月平均值的年内变化如图 3 所示。从中可以看出,不同产品的总云量都表现出了明显的季节变化,冬季为云量低谷期,此时西伯利亚高压持续南下,受干冷西北气流主导,大气层结构稳定、垂直运动较弱,抑制了云的形成^[24]。3 月东亚冬季风开始减弱,东南风携带黄海湿润气流北上,沿海地区总云量逐渐升高;西风槽东移与暖湿空气交汇,形成春季锋面云系,山东省内陆地区总云量也开始缓慢上升,由于春季蒙古气旋容易引发沙尘天气,地面观测总云量可能会因沙尘遮蔽而被低估,卫星反演过程中容易因沙尘与层云具有相似光学特性导致高估,而再分析产品通过多源观测验证及物理过程订正以最大限度规避沙尘对云量分析的干扰。5 月开始平均总云量出现明显升高,最高值出现在 6—8 月,这是由于 5—8 月夏季风盛行使得水汽充足,华北进入主汛期,云量随之增多^[25]。9 月东亚夏季风迅速南撤,山东省开始受到大陆高压控制,水汽减少导致总云量快速下降。ISCCP 总云量整体高于再分析

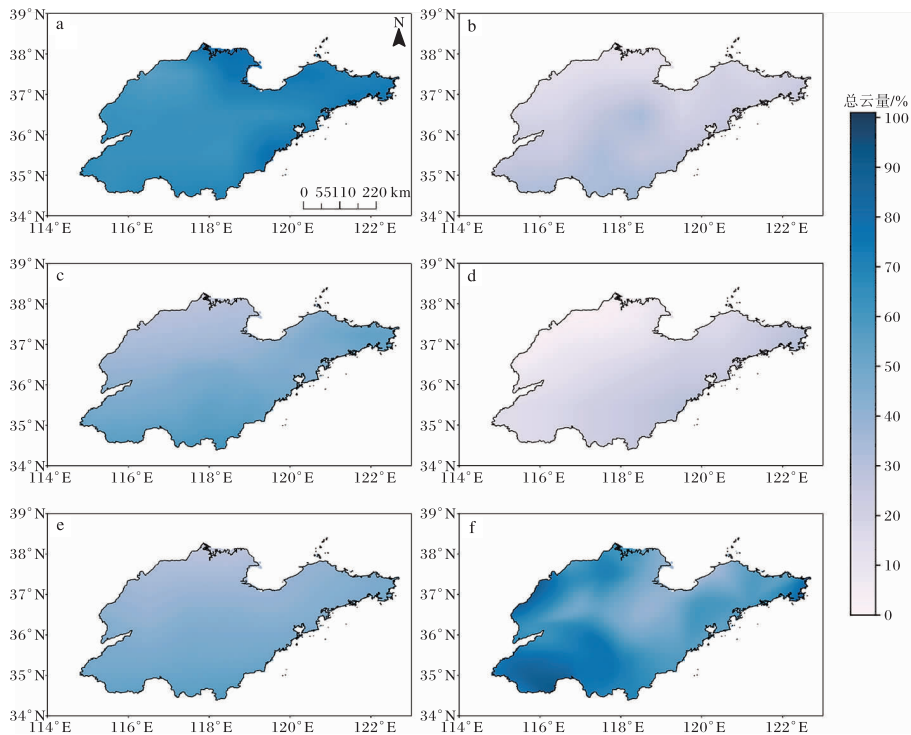


图2 1987—2016年 IISCCP(a)、CRA40(b)、ERA5(c)、JRA55(d)、CFSR(e)产品和地面观测(f)的平均总云量空间分布

资料,在3—5月份出现小高峰,月平均总云量接近70%,7月份开始逐月降低。JRA55的月平均总云量相比其他产品偏低5%~20%;CRA40在1月份和3月份与地面观测总云量基本一致;ERA5总云量在山东省高于其他再分析资料,在10月份和12月份与地面观测更为接近。在冬春季节,再分析产品总云量更接近于地面观测,而在总云量最高值的7月份,IISCCP产品与地面观测总云量一致性更好。

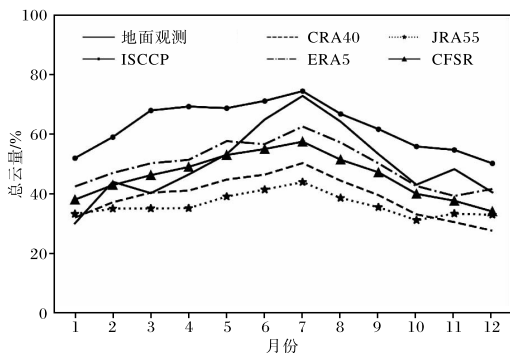


图3 不同产品总云量月平均值变化

为进一步研究总云量与主要气象因子之间的关系,分析了不同产品总云量与降水量和相对湿

度的相关系数(表1)。地面观测总云量与降水量相关系数最大,为0.909,4种再分析产品总云量与降水量相关系数也在0.7以上,IISCCP产品与降水量相关系数最低,且仅IISCCP未通过0.01的显著性检验。可以看出,总云量与降水量呈明显的正相关关系,云的形成需要充足的水汽,当大气中水汽含量较高时,总云量增加同时水汽的凝结也更容易产生降水。夏季受西太平洋副热带高压和东亚夏季风影响导致总云量和降水量同步增加,也增强了二者的相关性。利用云量时空分布特征可以优化数值模式初始场,改善云微物理参数化方案,高分辨率云量数据也可以辅助识别对流云团发展区域,从而降低降水落区偏差。从相对湿度来看,地面观测总云量与相对湿度相关性最高,为0.687,格点数据的总云量产品与其相关系数在0.5以下,未通过显著性检验。这是因为相对湿度不仅受空气中水汽含量的影响,也与温度存在密切关系,当温度升高时,即使水汽含量不变,相对湿度也会下降,但云量可能因温度升高导致对流活动增加而增多,此时虽然云量增加,但相对湿度反而可能较低。

表 1 不同产品总云量与主要气象因子的相关系数

气象因子	地面观测	ISCCP	CRA40	ERA5	JRA55	CFSR
降水量	0.909**	0.657*	0.766**	0.805**	0.815**	0.760**
相对湿度	0.687*	0.465	0.431	0.492	0.445	0.335

注：*、** 分别表示通过 0.05、0.01 显著性检验。

3.2 年平均变化

图 4 为不同产品总云量年平均值的年际变化,由图可知,不同产品的年际变化曲线一致性较高。全省总云量的年际波动范围较小,同一产品总云量年际变化幅度不超过 10%。2003 年山东省气候较为反常,降水偏多气温偏低,暴雨频繁且强度大,总云量出现明显上升趋势。2013 年山东省夏末秋初出现干旱少雨,全省平均降水量较常年同期大幅偏少,因此总云量也出现了明显下降,但 JRA55 资料在该年份未表现出下降趋势,这可能与其云量反演主要依赖辐射传输模型,采用的云量参数化方案比较保守有关^[26]。不同产品之间的总云量差距明显,JRA55 总云量整体最低,与 ISCCP 资料相比低估了 20 %左右,CRA40 与 JRA55 差距较小,但比其他三种产品低估 10 %左右,再分析资料总云量相较于 ISCCP 和地面观测数据存在一定的低估。

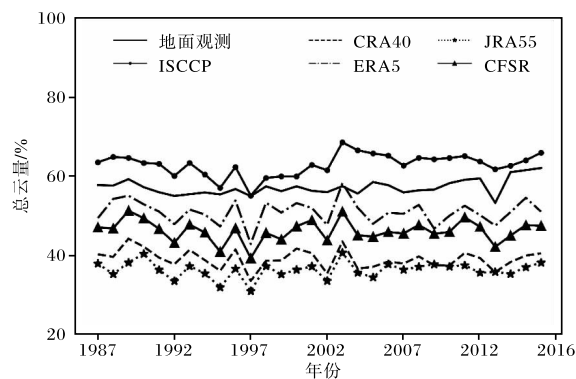


图 4 不同产品总云量年平均值变化

表 2 为每 10 年不同产品年平均总云量的变化趋势。可见,在 1987—1996 年的十年间山东省平均总云量呈现减少趋势,各产品的年平均总云量降幅均在 4%以上,ISCCP 总云量下降程度最高,达到 7.48%,地面观测总云量下降最少,为 4.08%;1997—2006 年间全省年平均总云量在波动中上升,ISCCP 总云量增加了 13.7%,变化趋势最为明显,地面观测总云量变化最少,为 1.64%;1987—2006 年 CRA40 与地面观测总云量变化趋势非常接近;2007—2016 年间平均总云量变化较为平缓,不同产品总云量有升有降,CRA40 和 CFSR 总云量变化幅度均为超过 1%,ERA5 与地面观测总云量变化趋势更为接近,二者仅差 0.05%/10 a。

总云量与温度和大气环流也关系密切,温度升高能够促进地表水分蒸发和垂直运动,但同时又增加了达到饱和所需要的水汽含量,许多学者研究表明温度升高会在一定程度上抑制云的形成^[27-28]。选取山东省 40 个分布均匀、时空连续性较好的地面观测资料站计算气温年代际变化趋势,发现 1987—1996 年全省平均气温上升 0.064 ℃/10 a,1997—2006 年全省平均气温下降 0.102 ℃/10 a,2007—2016 年全省平均气温上升 0.047 ℃/10 a。1987—2006 年总云量的变化对气候产生了负反馈,即总云量与温度呈相反的变化趋势;而由于在 2007—2016 年总云量变化幅度较小且不同资料表现出不同的变化趋势,温度与总云量未表现出明显的相关变化特征。

表 2 不同产品年平均总云量每 10 年变化趋势

单位: % · (10 a)⁻¹

起止年份	地面观测	ISCCP	CRA40	ERA5	JRA55	CFSR
1987—1996	-4.08	-7.48	-4.86	-5.35	-5.36	-6.78
1997—2006	1.64	13.7	1.93	4.30	2.82	5.06
2007—2016	2.11	-1.12	0.38	2.06	-1.36	-0.81

4 偏差空间分布特征

4.1 再分析产品与 ISCCP 总云量偏差空间分布

ISCCP 主要是基于卫星数据的反射率或亮温来区分云与晴空,容易受传感器性能和反演算法限制,而再分析资料同化了更多观测数据,算法中也考虑了不同气象要素之间的影响,其总云量产品更具适用性。但不同机构的同化系统和模型物理不同,导致总云量估算出现差异。为进一步对比 ISCCP 卫星资料和再分析产品总云量之间的相对一致性,将 ISCCP 产品总云量与不同再分析产品分别计算偏差,其空间分布如图 5 所示。

从山东省不同区域来看,环渤海区域整体偏差高于内陆地区,山东省北部的东营和滨州地区总云量偏差较大,黄河入海口处表现得尤其明显,在该地区,CRA40 和 JRA55 总云量相较于 ISCCP 偏低 30% 以上;ERA5 和 CFSR 产品比 ISCCP 总云量偏低 10%~20%。在沿海半岛和日照南部地区,ISCCP 总云量略高于再分析数据;在鲁中及鲁南地区,ERA5 产品总云量与 ISCCP 非常接近,各再分析资料与 ISCCP 云量偏差相较于其他地区也较小,部分地区甚至还表现出高估现象。

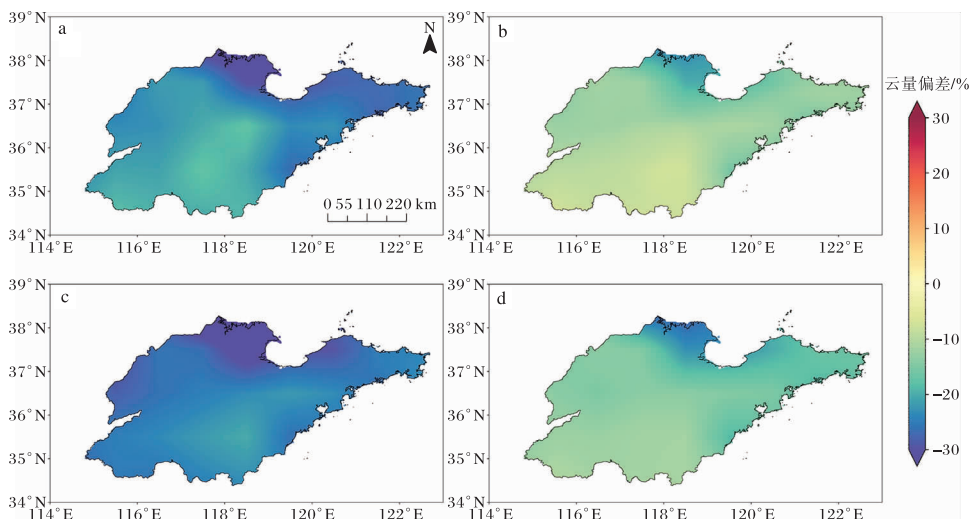


图 5 CRA40(a)、ERA5(b)、JRA55(c)、CFSR(d)与 ISCCP 的平均总云量偏差空间分布

4.2 不同产品与地面观测总云量偏差空间分布

为进一步研究不同格点数据与地面观测资料之间的总云量空间分布差异,采用双线性插值方法将格点数据插值到山东省及其周边 41 个站点上,不同格点数据与地面观测站点总云量的偏差分布如图 6 所示。总体来看,在山东省及周边地区,各产品的总云量自东向西逐渐由正偏差转为负偏差。ISCCP 总云量在山东省大部分地区存在高估,东部沿海地区高估偏差最高达到 20% 以上,这可能与冬季烟台、威海地区积雪覆盖影响有关。ISCCP 反演云量主要依赖可见光(VIS)和红外(IR)通道,若传感器缺乏中红外或短波红外波段,可能无法有效区分高反射雪地和冰云,产生云雪误判,从而导致 ISCCP 总云量在山东省主要积雪区高估现象严重,在这些地区反演云量时,应进

一步考虑云雪的区分问题。山东半岛工业排放和沙尘天气较为频繁,沿海地区易产生海雾,卫星反演时也容易被归为云量。此外,山东省处于中纬度地区,卫星观测天顶角较大时,光线穿过大气路径更长,从而产生更多散射干扰,也会导致薄云被高估。ERA5 和 CFSR 总云量产品相较于 CRA40 与 JRA55 来说更接近于地面观测,两者在山东省内偏差均在 $\pm 10\%$ 以内。CRA40 和 JRA55 总云量整体表现为低估,在鲁中地区与地面观测数据一致性较高,而在山东省西北部至河北省地区最高负偏差达到 30% 以上。ERA5 和 CRA40 产品采用四维变分同化技术,结合更高密度、更多种类的观测数据,因而对云相关变量如水汽和温度的约束更强,但 CRA40 采用的云微物理方案可能会对浅对流云有所低估,在区域气候

模式研究中需进一步优化浅对流云参数化方案以 降低鲁西北云量偏差。

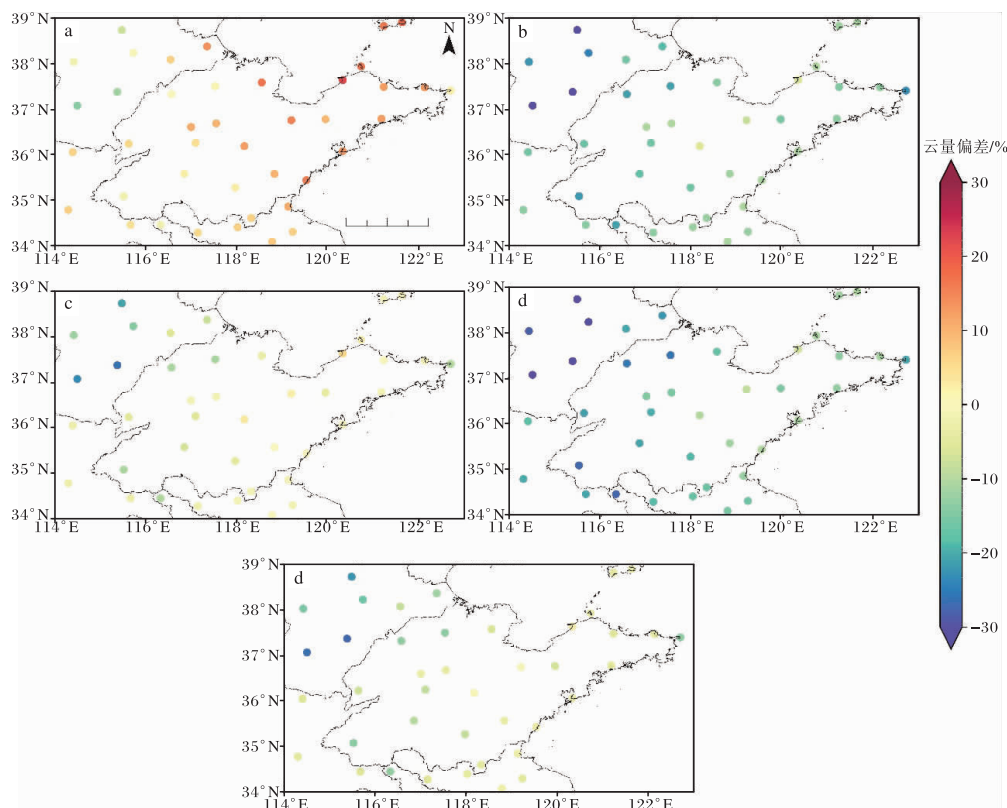


图6 ISCCP(a)、CRA40(b)、ERA5(c)、JRA55(d)、CFSR(e)与地面观测总云量偏差的空间分布

为了量化不同产品与地面观测总云量之间的相对一致性,计算相关系数如表 3 所示,其结果均通过 0.01 的显著性检验。可以看出,在山东省及周边地区,CRA40 同化了更多国内本地数据,其总云量与地面观测相关性最高,相关系数达到 0.823;ERA5 采用了先进的算法和更丰富的同化数据源,与地面观测总云量相关系数也达到了

0.810 以上;CFSR 和 JRA55 与地面观测相关系数略低,为 0.812 和 0.805。整体来看,再分析产品同化更多种类资料,与地面观测总云量相对一致性更高,而 ISCCP 产品主要依靠卫星数据对云量进行反演,受限于遥感反演物理算法与地表复杂性,其与地面观测相关系数最低,为 0.738。

表 3 不同产品与地面观测总云量的相关系数

不同产品	ISCCP	CRA40	ERA5	JRA55	CFSR
相关系数	0.738**	0.823**	0.816**	0.805**	0.812**

注:**表示通过 0.01 显著性检验。

5 结 论

本研究利用 CRA40、ERA5、JRA55 与 CFSR 四种再分析资料、地面观测资料与 ISCCP 总云量数据,揭示了 CRA40 总云量在山东省的时空分布特征及其相较于其它产品的差异性,讨论了不同产品总云量与 ISCCP 资料及地面观测数据的

偏差特征,分析了不同资料的总云量在不同下垫面和典型天气系统下的优势与局限性,为东亚季风区高分辨率再分析资料的云参数化方案改进提供了参考。得到以下主要结论。

(1)全省总云量分布不均,在沿海和西南部出现云量高值区域,ISCCP 总云量相较于再分析资

料整体较高;ERA5 和 CFSR 总云量的空间分布特征明显,表现出南多北少的特征,比 ISCCP 产品稍低,整体高于 CRA40 和 JRA55。

(2)五种资料的总云量月变化和年变化趋势都较为一致,总云量最高值均出现在 6—8 月份。ISCCP 总云量整体高于再分析资料,在冬春季,再分析产品总云量更接近于地面观测,而在夏季,地面观测总云量与 ISCCP 产品吻合度更高。总云量与降水量呈明显的正相关关系,四种再分析产品总云量与降水量相关系数在 0.7 以上。全省总云量的年际波动范围较小,从 1987 年开始出现波动下降趋势,10 年间各产品总云量降幅均在 4%以上,到 1996 年出现明显增高,之后开始转为波动上升,2007 年以后总云量变化较为平缓。同一产品的总云量年际变化为 5%~10%,但是不同产品之间的总云量差距明显,JRA55 总云量整体最低。ERA5 因其先进的算法和更丰富的同化数据源表现优秀,CRA40 因为同化了更多国内本地数据,在细节上表现较好,相较于其他资料二者可以更好地呈现出总云量的时空分布特征,接下来可以引入更多要素如不同高度、不同类型的云进行分析探讨。

(3)再分析资料与 ISCCP 平均总云量的偏差在环渤海区域整体高于内陆地区,在山东省北部的东营和滨州总云量偏差较大。烟台北部和日照地区,ISCCP 产品总云量略高于再分析产品。在鲁中及鲁南地区,各再分析资料与 ISCCP 云量偏差相较于其他地区偏小。在烟台、威海地区受积雪覆盖及卫星传感器等因素影响,导致 ISCCP 总云量在这些地区高估现象严重。

参考文献:

- [1] 李娅,郭建侠,曹云昌,等. FY-2G 云量产品与地面观测云量对比分析[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 514-523.
- [2] 杜川利. 关中东部地区云量变化分析[J]. 陕西气象, 2012(1): 5-9.
- [3] 丁守国,赵春生,石广玉,等. 近 20 年全球总云量变化趋势分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 670-677+706.
- [4] 符传博,丹利,冯锦明,等. 1960—2012 年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系[J]. 大气科学, 2019, 43(1): 87-98.
- [5] 王旻燕,王伯民. ISCCP 产品和我国地面观测总云量差异[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 411-418.
- [6] 向华,张峰,江静,等. 利用 CFSR 资料分析近 30 年全球云量分布及变化[J]. 气象, 2014, 40(5): 555-561.
- [7] 王帅辉,韩志刚,姚志刚. 基于 CloudSat 和 ISCCP 资料的中国及周边地区云量分布的对比分析[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 767-779.
- [8] 董文乾,张社岐. 1957—2008 年陕西云量分布与变化趋势分析[J]. 陕西气象, 2012(2): 13-17.
- [9] KISER D P. Analysis of total cloud amount over China, 1951—1994 [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(19): 3599-3602.
- [10] ZHAO W, ZHANG N, SUN J. Spatiotemporal variations of cloud amount over the Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(3): 371-380.
- [11] 王捷馨,赵中军,尚可政,等. 环渤海地区云量的时空分布特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 125-133+140.
- [12] 余万明,叶成志,杨晓武,等. 地面“云能天”自动化观测进展[J]. 气象科技进展, 2022, 12(5): 19-26.
- [13] 张晋保,贺芳,贾亚辉,等. 地面观测中云的自动化识别[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(增刊 1): 166-170.
- [14] 刘瑞霞,陈洪滨,郑照军,等. 总云量产品在中国区域的分析检验[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 571-578.
- [15] 王可丽,江灏,陈世强. 青藏高原地区的总云量—地面观测、卫星反演和同化资料的对比分析[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 252-257.
- [16] 席琳,师春香,赵笔峰,等. 1995—2010 年静止卫星云量数据检验和评价[J]. 气象科技, 2013, 41(1): 8-14.
- [17] 张琪,李跃清,陈权亮,等. 近 46 年西南地区云量的时空变化特征[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 339-348.
- [18] SCHIFFER R A, ROSSOW W B. The international satellite cloud climatology project (ISCCP): the first project of the world climate research pro-

- gramme[J]. Bull American Meteorological Society, 1983, 64(7): 779-784.
- [19] YOUNG A H, KNAPP K R, INAMDAR A, et al. The international satellite cloud climatology project H-Series climate data record product[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(1), 583-593.
- [20] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [21] SHINYA K, YUKINARI O, YAYOI H, et al. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2015, 93(1): 5-48.
- [22] SAHA S, MOORTHY S, PAN H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. Bull American Meteorological Society, 2010, 91(8): 1015-1057.
- [23] SAHA S, MOORTHY S, WU X R, et al. The NCEP climate forecast system version 2[J]. Journal of Climate, 2014, 27(6): 2185-2208.
- [24] CHEN S, SONG Y, WATANABE M. Dynamical link between Siberian High and winter cloud cover over East Asia[J]. Journal of Climate, 2018, 31(11): 4349-4362.
- [25] 李昀英, 寇雄伟, 方乐铎, 等. 中国东部云-降水对应关系的分析与模式评估[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 766-777.
- [26] KOBAYASHI S, OTA Y, HARADA Y, et al. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2015, 93(1): 5-48.
- [27] 孙国荣, 方乐铎, 李昀英, 等. 1985—2006年中国中东部总云量变化趋势分析[J]. 气象与减灾研究, 2015, 38(3): 10-18.
- [28] 吴伟, 王式功. 中国北方云量变化趋势及其与区域气候的关系[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 651-658.