

邹双泽,白爱娟,何科,等.ERA5资料在蓟州复杂地形下的检验与应用[J].海洋气象学报,2024,44(1):118-128.
ZOU Shuangze, BAI Aijuan, HE Ke, et al. Validation and application of ERA5 in complex terrain of Jizhou[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(1): 118-128. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20221210001. (in Chinese)

ERA5资料在蓟州复杂地形下的检验与应用

邹双泽¹,白爱娟²,何科³,金海东⁴,黄金颖⁴,金波⁵

(1.重庆市巴南区气象局,重庆 巴南 401320;2.成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225;3.攀枝花市气象局,四川 攀枝花 617000;4.天津市蓟州区气象局,天津 蓟州 301999;5.天津市宝坻区气象局,天津 宝坻 301800)

摘要 以复杂地形的天津蓟州为例,通过对比距离蓟州最近的大兴探空站资料与欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)资料的差异,对基于ERA5资料生成的强对流指数在蓟州的适用性进行检验和评估。结果表明:(1)ERA5资料与大兴探空站探测的位势高度、气温和风速在对流层高度吻合,说明ERA5资料能够描述蓟州高空气象条件,且对低空的表现能力比高空准确,各要素中大气湿度的表现相对较差;(2)基于ERA5生成的对流指数中,与强对流天气密切相关的对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)、K指数、沙瓦特指数(Showalter index, SI)和大气可降水量(precipitable water, PW)与大兴探空站对应参数的相关系数分别达到0.66、0.90、0.93和0.99,表明利用ERA5构建的对流指数能够揭示大气不稳定层结条件;(3)ERA5对流指数变化与蓟州降水过程相对应,ERA5能够反映天气的变化和发展,为强对流潜势分析提供参考。

关键词 蓟州;大兴探空站;ERA5资料;高空探测;强对流指数

中图分类号: P459 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)01-0118-11

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20221210001

Validation and application of ERA5 in complex terrain of Jizhou

ZOU Shuangze¹, BAI Aijuan², HE Ke³, JIN Haidong⁴, HUANG Jinying⁴, JIN Bo⁵

(1. Banan Meteorological Bureau of Chongqing, Chongqing 401320, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Sichuan 610225, China; 3. Panzhihua Meteorological Bureau, Sichuan 617000, China; 4. Jizhou Meteorological Bureau of Tianjin, Tianjin 301999, China; 5. Baodi Meteorological Bureau of Tianjin, Tianjin 301800, China)

Abstract By comparing the differences between the data of Daxing sounding station, the nearest to Jizhou, Tianjing, and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5 (ERA5) data, the applicability of the ERA5-derived strong convection index under complex terrain conditions of Jizhou is validated and evaluated. The results are listed below. (1) The geopotential height, air temperature, and wind speed detected by Daxing sounding station are consistent with the corresponding ERA5 in the troposphere, which indicates that ERA5 can represent the meteorological characteristics above Jizhou, and it performs better at low altitude than at high altitude, but has poor

收稿日期:2022-12-10;修回日期:2023-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(U2242202);成都信息工程大学教师科技创新能力提升计划重大项目(KYTD202201);中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J012)

第一作者简介:邹双泽,女,硕士,工程师,主要从事灾害性天气监测预警研究,317973133@qq.com。

通信作者简介:白爱娟,女,博士,教授,主要从事天气动力学研究,baiaj@cuit.edu.cn。

performance on atmospheric humidity. (2) The convection indexes based on ERA5, such as CAPE (convective available potential energy), K index, SI (Showalter index), and PW (precipitable water), are all closely related with strong convective weather, and the correlation coefficients between them and the corresponding parameters of Daxing sounding station are 0.66, 0.90, 0.93, and 0.99, respectively, indicating that these indexes can reveal the stratification instability conditions. (3) The variation of the convection indexes constructed by ERA5 corresponds with the precipitation process in Jizhou, and ERA5 can reflect the change of weather and provide reference for analyzing strong convective potential.

Keywords Jizhou; Daxing sounding station; ECMWF Reanalysis v5 (ERA5); aerial exploration; strong convective index

引言

强对流天气严重威胁人民生命财产安全,是局地气象灾害发生的重要原因。如北京“7·21”局地特大暴雨^[1-3],引发的城市内涝和山区泥石流造成 78 人遇难。又如河南郑州“7·20”特大暴雨^[4-5],造成全市 380 人因灾死亡或失踪。在特定天气形势和环境条件下产生的强对流天气是短时临近预报的重难点,高空探测为其判识提供了基本思路,探索导致强对流发生的有利环境条件是灾害预警的重要方法^[6-7]。俞小鼎等^[8]研究表明,低层水汽充沛、层结不稳定和抬升触发机制是强对流发生的有利环境条件。赵海军等^[9]分析表明低层冷暖平流强迫是大气层结不稳定建立或维持的主导者。基于探空资料的强对流指数为分析强对流天气潜势提供了重要信息,如刘玉玲^[10]在强对流发生物理机制的分析中,指出对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)、粗里查逊数等参量在天气预测中具有重要作用。Tian 等^[11]肯定了强对流指数对我国中东部降水预报具有指示意义。王迪等^[12]利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)资料计算了多种物理参数,结果表明整层大气可降水量、地面露点温度和 K 指数等在短时强降水发生前后都有明显的变化。

强对流指数用于分析对流层大气不稳定性,为强对流分析提供了途径。高空探测资料获取的对流层温湿度和风场特征,以及生成强对流指数,可以作为天气分析的实况。但是探空站稀少,大多地区因缺少探空站而不能直接获取有效的对流指数。基于多源观测和数值模式的再分析资料,同化了各种观测资料,具有时间序列长、覆盖范围广和格点均匀以及分

辨率高的优点,能够提供对流层各高度层的温度、湿度、风速和气压等,可以间接获取各种对流特征参数,为没有探空站的复杂地形区强对流天气潜势分析提供重要的资料^[13-15]。ECMWF 的 ERA5 资料在全球得到广泛应用^[16],但在复杂地形区资料的可靠性仍需要验证。

一方面,处于复杂地形的天津蓟州短时强降水频繁,夜发性显著,近年来多次出现暴雨洪涝灾害^[17-18]。另一方面,蓟州甚至天津本地未布设高空站,对流层大气的基本信息量少,严重影响强对流天气灾害预警。西来和南来的天气系统是影响蓟州天气的主要因素,依据可参考性和就近原则,实际业务中使用上游北京大兴探空站(蓟州偏西约 80 km 处)来分析蓟州天气环流形势^[19]。本文以大兴探空站的资料为真值,检验 ERA5 资料的适用性,尝试用 ERA5 资料构建蓟州强对流天气指数,为以后蓟州的强降水预警模型和算法研究奠定基础。

1 资料与方法

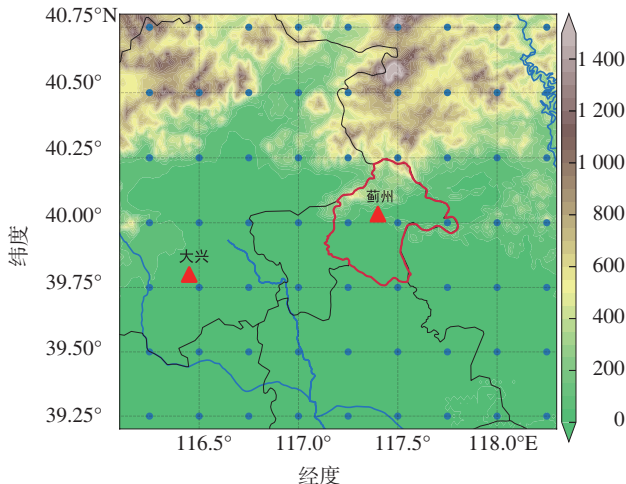
1.1 研究区域

蓟州位于天津最北端,东西横跨 40 km,南北跨度 75 km。地势北高南低,北部属于燕山余脉,最高峰九山顶海拔 1 078.5 m,南部为冲积平原,属于典型的一半平原一半山地的复杂地形区(图 1)。北京大兴探空站距蓟州约 80 km,选择 ERA5 资料在 39.75°N、116.5°E 的格点值与大兴探空站进行对比分析。

1.2 研究资料

(1) 大兴探空站资料。由气象信息综合分析处理系统(Meteorological Information Combine Analysis and Process System, MICAPS)获取 2014 年 4—10 月大兴探空站(54511)每日 08 时和 20 时(北京时,下同)的探测资料,共计 428 个时次。资料包括 925、

850、700、500、400、300、250、200、150 和 100 hPa 共 10 个气压层的位势高度、气温、露点温度、温度露点差和风向风速,以及 CAPE 值等对流指数。



蓝色圆点—ERA5网格点;红色三角—大兴探空站和蓟州国家级地面气象观测站位置;色阶—海拔,单位:m。

图1 ERA5 网格点及站点位置分布

Fig.1 ERA5 grid point and location of meteorological stations

(2) 蓟州国家级地面气象观测站降水资料。天津市蓟州区气象局提供的 2014 年暖季 4—10 月国家级地面气象观测站逐小时降水资料。

(3) 欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料^[20]。ERA5 资料对外开放,通过 <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> 下载,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 h。本文将用到其中 2 个子集:ERA5 逐时气压层资料集,包括气温、垂直速度和位势高度等多个要素,垂直方向有 61 个气压层可选,选用与探空资料一致的 10 个固定气压层 (925、850、700、500、400、300、250、200、150 和 100 hPa);ERA5 逐时单层资料集,包含模式反演的各类物理参数,分析的强对流指数来自这个资料集。

(4) 强对流指数。高空探测可获得反映大气湿层结特征的热力学参数,用于分析强对流天气发生潜势的环境背景。常用指数有 CAPE、K 指数、沙瓦特指数 (Showalter index, SI) 和大气可降水量 (precipitable water, PW)。其中,CAPE 是反映大气层结不稳定的重要参数,定义为从自由对流高度到平衡高度浮力能的垂直积分。K 指数是综合考虑 850~500 hPa 平均温度递减率、850 hPa 露点温度和 700 hPa 大气饱和度的参数,能够反映大气低层的热力和水汽条件。SI 是气块从 850 hPa 开始按干绝热

递减率,抬升至凝结高度后,再按湿绝热递减率抬升至 500 hPa 时,环境温度与气块的温度差。PW 是单位面积气柱内所含的水汽总量,水汽参与是对流发生的重要条件。通过 ERA5 获取的大气基本物理量和强对流指数,与大兴探空站进行对比,以期对 ERA5 资料在蓟州强对流天气中的适用性进行检验分析。

1.3 研究方法

采用统计量平均偏差 (Bias)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 来检验不同高度层观测物理量和 ERA5 再分析资料物理量间的偏差,说明再分析资料对真实大气的模拟效果。同时,采用相关系数 (R) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE),评价再分析资料反演的强对流指数的适用性,相关系数越接近 1,再分析资料反演的强对流指数越准确。相关计算公式如下:

$$V_{\text{Bias}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_i, \quad (1)$$

$$V_{\text{MAE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad (2)$$

$$V_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (4)$$

式中: V_{Bias} 为平均偏差值, V_{MAE} 为平均绝对误差值, V_{RMSE} 为均方根误差值, R 为相关系数值, x 为大兴探空站观测值, y 为 ERA5 再分析资料值, n 为样本数。

2 ERA5 资料对流层各气象要素分析

首先选取距离大兴探空站最近的一个格点,其次挑选出与探空资料同时次的 ERA5 格点资料。对比分析多时次大兴探空站与 ERA5 资料的位势高度、气温、露点温度、温度露点差、水平风速,从地面到对流层顶的垂直分布,确定 ERA5 资料揭示蓟州及周边对流层环境条件的能力。

分析两类资料各高空气象要素的平均廓线,发现两者在位势高度 (图 2a) 和气温 (图 2b) 的垂直分布上几乎重叠,各高度层的气温差在 0.5°C 以内,位势高度差值非常小,说明 ERA5 产品对位势高度和气温的模拟在蓟州附近效果好,能够准确反映夏季对流层的气温和气压的垂直分布特征。

分析 ERA5 资料对大气层水汽条件的表现,将 ERA5 相对湿度换算成与探空一致的露点温度,对应的露点温度(图 2c)和温度露点差(图 2d)廓线,发现 ERA5 与大兴探空站露点值在 500 hPa 以下吻合,即在低层的水汽聚集区,ERA5 的露点温度能够揭示大气湿度环境条件。在 500 hPa 高度以上,大气中的水汽含量相对较少,ERA5 反演的露点温度和探空获取的露点温度差异增加,ERA5 的露点误差增大,对湿度的表现能力下降。同时温度露点差在 700 hPa 以下两种资料数值接近,偏差在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,说明 ERA5 对湿度的描述较准确。从 700 hPa 向上到 200 hPa,ERA5 资料的温度露点差比探空资料偏小,反映的大气偏湿,结果将影响到对流层与湿

度有关的对流指数反演,其中重要的就是 CAPE 值。

分析 ERA5 对大气流场的反演能力,由图 2e—f 中水平风速的廓线看,ERA5 经向风和纬向风与探空观测曲线重合率高。边界层内夏季平均纬向西风速最小为 $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随高度升高,纬向风速增加,在 200 hPa 附近急流带风速超过 $30.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,各高度上两种资料的纬向风吻合。经向风速数值小,且在 850 hPa 以下为正值,表明有南风发展,平均值最大为 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。850 hPa 以上转变为负的偏北风,随高度升高北风增强,且在各高度上两类资料吻合。因此 ERA5 风场资料准确地反映了蕪州周边大气流场变化,且可靠性较高,这对分析当地强对流天气风的水平切变和垂直切变非常有利。

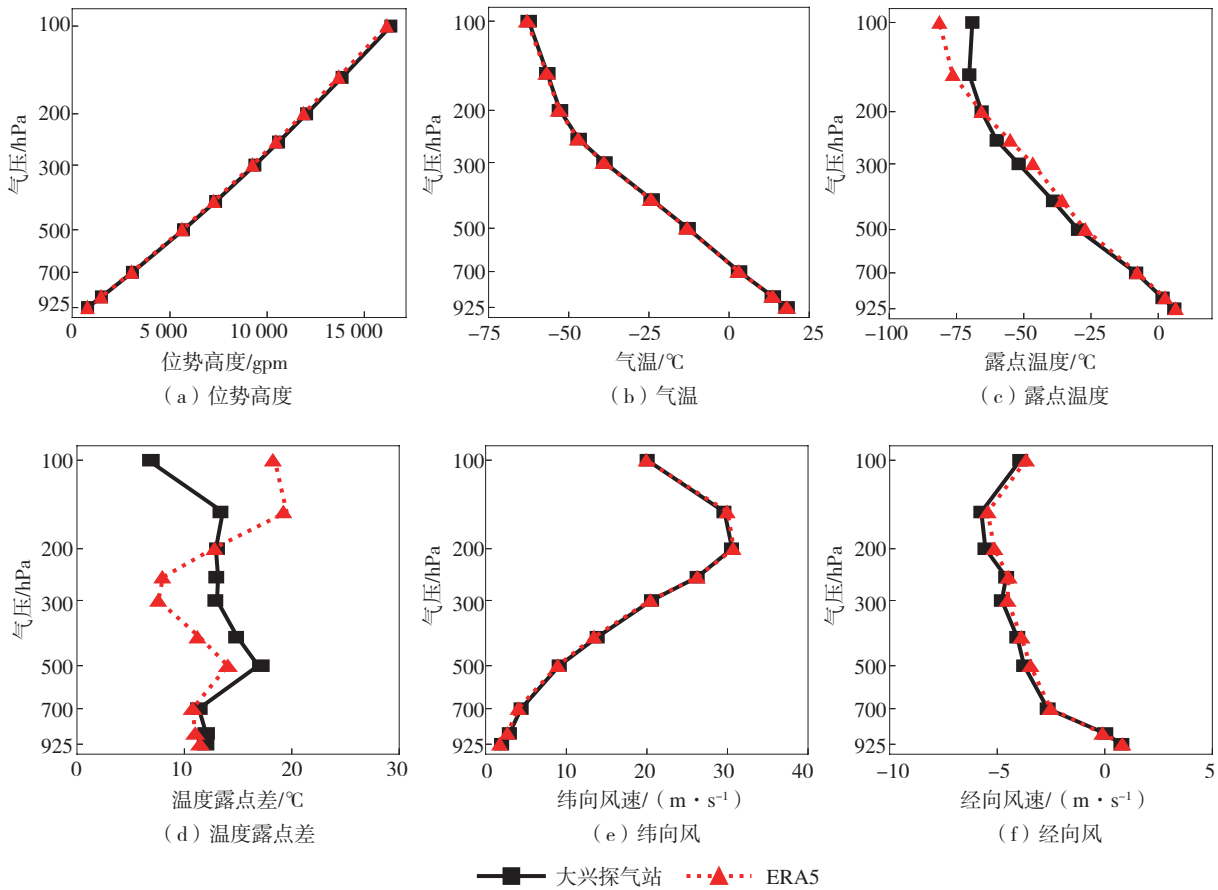


图 2 2014 年 4—10 月大兴探空站与距离最近的 ERA5 格点各气象要素的平均廓线
Fig.2 Average profile of each meteorological element at Daxing sounding station and the nearest ERA5 grid point from April to October 2014

进一步分析各气象要素的相关性垂直分布特征。由多种气象要素的相关系数廓线(图 3a)对比发现,低层气象要素的相关系数高,500 hPa 高度以下均大于 0.8。在对流层 400 hPa 以上,温湿度物理量相关

系数降低。对比不同气象要素,发现 ERA5 的经向风速和纬向风速与探空的风速相关性最好,对流层从低空到高空,相关系数均达到 0.9 以上。气温的相关性较高,200 hPa 以下相关系数达到 0.8 以上,200 hPa

以上相关系数降低到 0.6~0.8。相比而言,露点温度和温度露点差的相关性较差,300 hPa 以下相关系数大于 0.8,300 hPa 以上相关系数骤降到 0 左右,甚至出现负值。由此说明 ERA5 资料在对流层 500 hPa 以下的低层效果良好,可以反映大气温湿和流场的实际状况,但在对流层高层效果降低。

对比两类资料各层气温分布(图 3b),发现气温平均偏差小于 0.5 °C,在边界层内气温平均偏差小于 0.1 °C,平均绝对误差为 0.5~1.4 °C,说明 ERA5 的气温值在边界层反演效果好。随高度上升,气温下降,平均偏差和平均绝对误差趋于增大,ERA5 对低层气

温表现能力优于高层。露点温度(图 3c)和温度露点差(图 3d)的平均绝对误差也表现为随高度升高而增大,在低空露点的平均偏差和平均绝对误差小于 5.0 °C。但到了对流层高层,露点的误差快速增长,平均偏差超过 5.0 °C。温度露点差的平均偏差在 700 hPa 以下小于 -2.0 °C,平均绝对误差在 5.0 °C。在 300 hPa 附近温度露点差的平均偏差达到最大值 4.5 °C。

分析两类资料的水平风速差异的廓线(图 3e—f),发现从边界层到对流层中层 500 hPa,ERA5 反演的水平风速平均绝对误差小于 1.5 m·s⁻¹,能够满足蕪州地区天气分析和研究的需求。

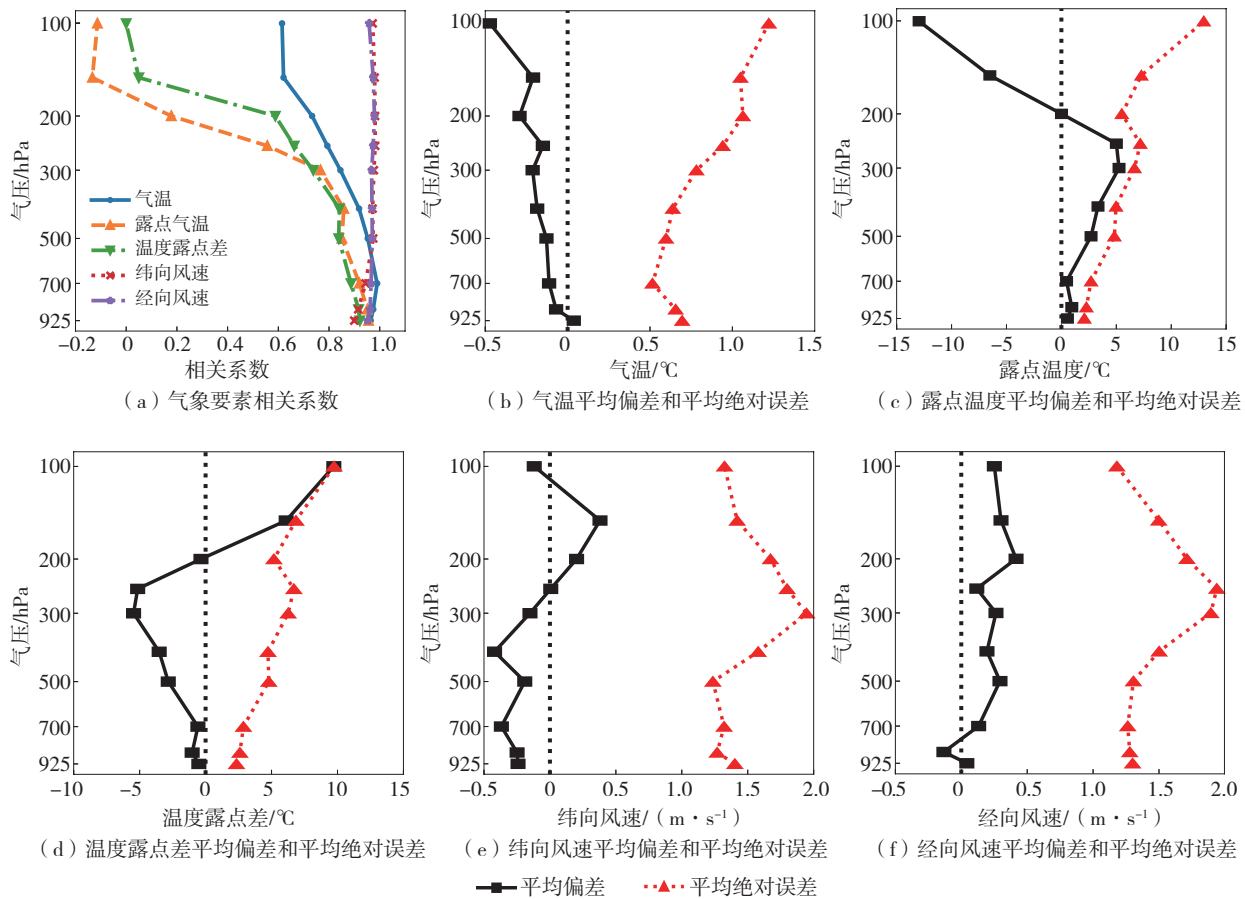


图3 ERA5 与大兴探空站探测的气象要素相关系数以及不同要素的平均偏差和平均绝对误差廓线
Fig.3 Correlation coefficient of meteorological elements between ERA5 and Daxing sounding station; profile of mean deviation and mean absolute error between different elements

综上所述,大兴探空站资料与 ERA5 资料的对比分析说明 ERA5 气象要素产品在蕪州临近地区能较好描述大气基本状态,其中位势高度、气温和风速与探空资料吻合,误差较小,尤其是各要素在对流层低层的表现能力比高层优越,但湿度的误差相对较大,尤其是在大气高层。

3 ERA5 强对流指数的检验分析

3.1 对流有效位能

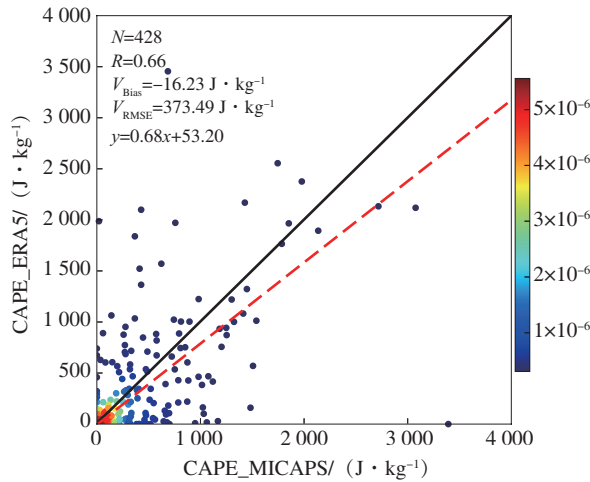
ERA5 直接对外发布 CAPE 产品,探空资料的 CAPE 来自 MICAPS 系统,对比 2014 年 4—10 月大兴探空站资料与 ERA5 资料的 CAPE 值散点分布(图

4a), 两类资料的相关系数为0.66, 通过了0.01显著性检验, 说明 ERA5 资料的 CAPE 值在蓟州具有可用性。以探空资料 CAPE 为 x , ERA5 资料的 CAPE 值为 y , 两类资料序列的回归方程为 $y=0.68x+53.20$, 表明 ERA5 反演的 CAPE 值整体略偏低。

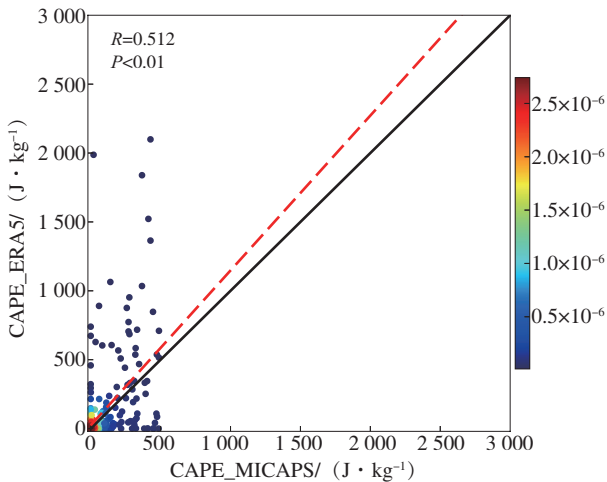
大气的 CAPE 值较多出现在 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 分析 CAPE 小于和大于 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 两种情况以说明 ERA5 资料的可靠性, 其中高 CAPE 值对强对流天气分析至关重要。在 CAPE 低值区(图 4b), ERA5 的 CAPE 值较探空偏大; 在 CAPE 高值区(图 4c), ERA5 的 CAPE 值较探空资料值略偏小。即在不同阈值区间, CAPE 值的误差不同, 且在 CAPE 的低值

区误差相对较小, 随 CAPE 值增大, 误差变大。

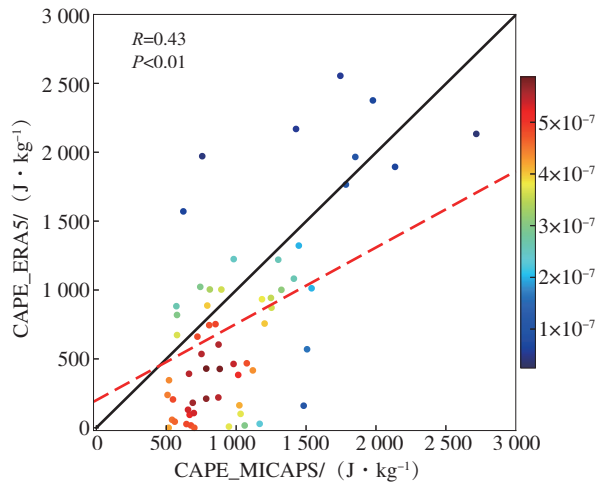
由表 1 中 ERA5 资料的 CAPE 与大兴探空站对值各月的相关系数分布上看, 4 月两类资料的 CAPE 相关系数达 0.874, 表明相关性好。其次是 8 月和 9 月相关系数较高, 分别为 0.662 和 0.653, 通过 0.01 的显著性检验。5 月和 6 月的相关系数值最低。以上分析说明在夏季强对流天气活跃的 6—8 月, ERA5 格点资料 CAPE 产品在蓟州区的表现能力优越, 能够准确地反映蓟州复杂地形下的大气不稳定状态。CAPE 值是对流层低空温湿度的综合反映, 正是 ERA5 温湿度层结数据在低层的良好表现, 才是 CAPE 正确的原因。



(a) CAPE散点密度



(b) 小于 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 CAPE 散点密度



(c) 大于 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 CAPE 散点密度

黑色实线—线性1:1线; 红色虚线—线性拟合线; 色阶—散点密度。

图 4 大兴探空站与 ERA5 的 CAPE 散点密度分布

Fig.4 Scatter plot of CAPE between Daxing sounding station and ERA5

表1 大兴探空站与 ERA5 的强对流指数的相关系数

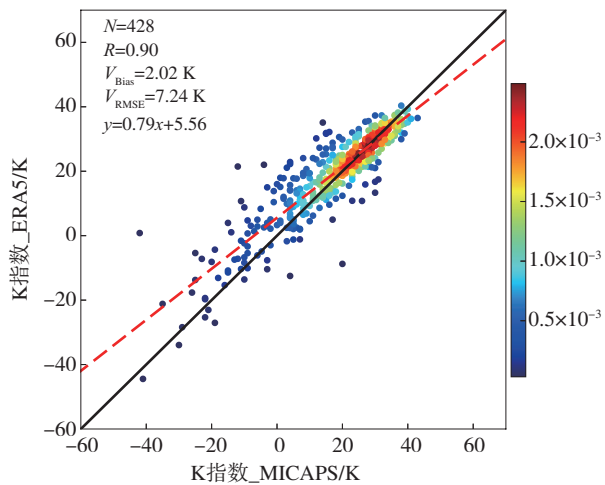
Table 1 Correlation coefficient of CAPE, K index, SI, and PW values between Daxing sounding station and ERA5

| 强对流指数 | 相关系数 | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 |
| CAPE | 0.874 | 0.456 | 0.468 | 0.553 | 0.662 | 0.653 | 0.539 |
| K指数 | 0.860 | 0.828 | 0.722 | 0.803 | 0.736 | 0.878 | 0.891 |
| SI | 0.921 | 0.897 | 0.858 | 0.905 | 0.837 | 0.955 | 0.924 |
| PW | 0.976 | 0.971 | 0.952 | 0.977 | 0.976 | 0.977 | 0.971 |

注:表中数值均已通过 0.01 显著性检验。

3.2 K 指数

K 指数常用在强对流天气潜势分析中,在实际业务工作中是一个非常有用的预报参数,强对流发生时,通常 K 指数值越大,对流强度越大。对比分析大兴探空站与 ERA5 资料获取的 K 指数的散点分布(图 5),发现两种资料的 K 指数都集中在 20~40 K。ERA5 资料的 K 指数和探空站的 K 指数显著相关,相关系数为 0.90。同上一节分析类似,两类资料的回归方程可表示为 $y=0.79x+5.56$,平均偏差为 2.02 K,均方根误差为 7.24 K。且当 K 指数小于 0 时,ERA5 较探空站的 K 指数偏大,随着 K 指数增大,偏差变小,资料的离散度减小。这说明 ERA5 资料的 K 指数在蓟州临近地区与探空资料非常吻合,分析强对流天气可行性高。



黑色实线—线性1:1线;红色虚线—线性拟合线;色阶—散点密度。

图5 大兴探空站与 ERA5 同位置同时次 K 指数散点密度分布
Fig.5 Scatter plot of K index at the same location and time from Daxing sounding station and ERA5

K 指数逐月相关系数高,说明 ERA5 反演的 K 指数在该地区应用效果良好(表 1)。其中 10 月的相关系数高达 0.891。6 月、7 月和 8 月的相关系数分别为 0.722、0.803 和 0.736,数值略有降低。6 月、7 月和 8

月中 K 指数曲线波动振幅小(图 6),也是 K 指数平均值最大的 3 个月,反映了盛夏季节大气水汽含量充沛,层结稳定性下降,对流发展较频繁的基本特征。

3.3 沙瓦特指数

实际业务工作中 SI 可用于强对流天气的判别和分析,具有实用性。已有研究^[12]表明,SI 为负数且绝对值大时,对流强度越大。ERA5 资料未发布 SI 产品,本文通过天气学算法公式^[21]得到 SI。SI 相关系数达到 0.93,比 K 指数的相关性高,数据散点分布高度集中在 0~10 K(图 7)。两类资料的回归方程为 $y=0.89x+0.42$,可以看到两者接近于 $y=x$,说明 ERA5 的 SI 与实况吻合,应用效果佳。且当 SI 小于 0 K 时,ERA5 较探空资料偏大,当 SI 大于 0 K 时,ERA5 较探空资料偏小。随着 SI 增加,两类资料的离散度减小,尤其当 SI 大于 10 K 时,二者的偏差最小。4 月、9 月和 10 月 ERA5 资料和探空资料 SI 的相关系数分别达到 0.921、0.955 和 0.924,ERA5 反演的 SI 效果优异。

3.4 大气可降水量

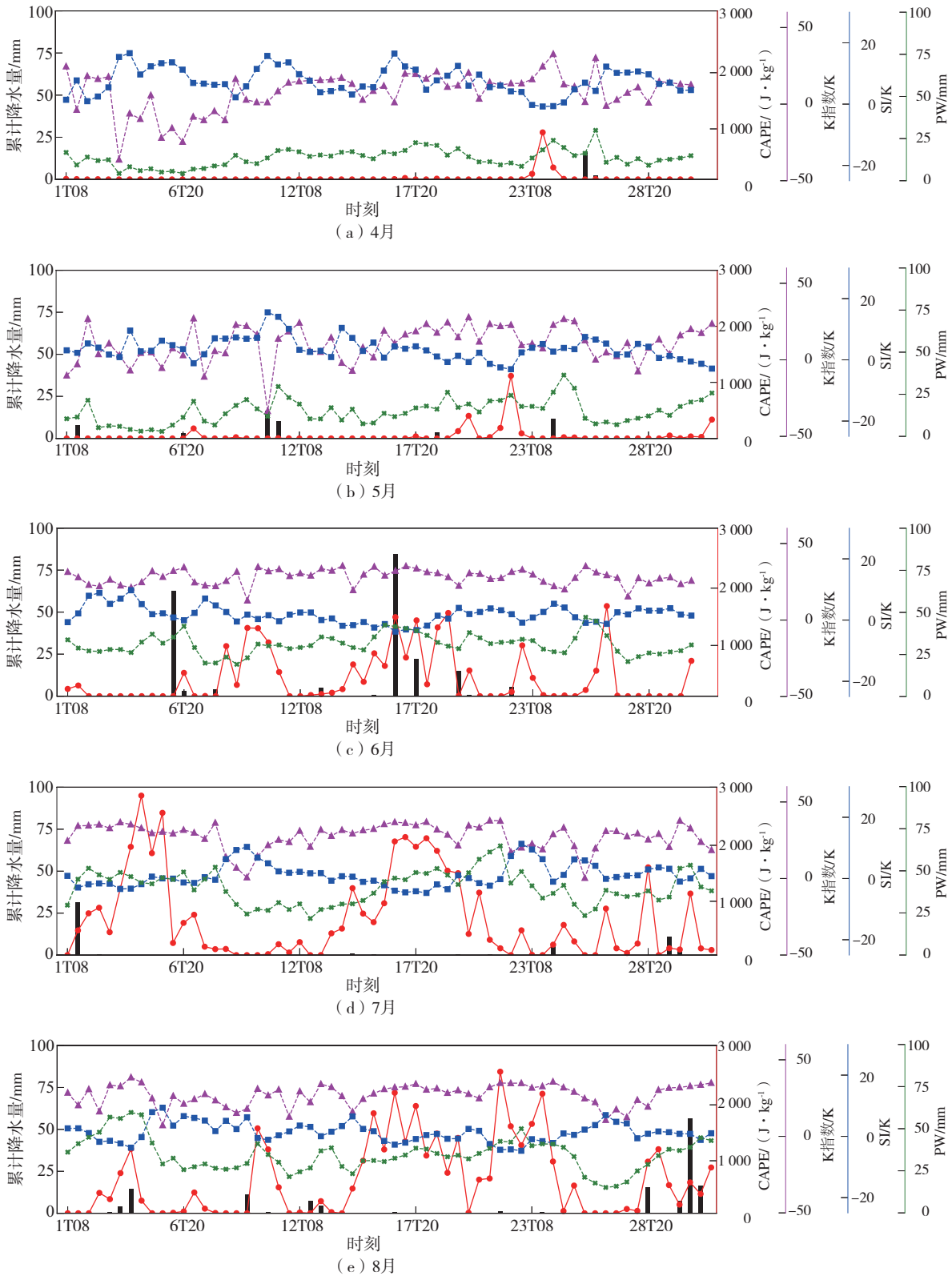
大气可降水量(PW)表示整层大气的水汽含量,业务中常用来分析水汽条件和识别对流类型。PW 数值越大,表示可能的降水量越大。ERA5 资料直接提供了 PW 产品,对比结果表明 ERA5 和大兴探空站 PW 显著相关(图 8),相关系数高达 0.99。线性回归方程为: $y=0.97x+1.26$ 。表 1 中 4—10 月两类资料 PW 的相关系数均大于 0.95,并通过 0.01 的显著性检验。分析图 6 可知,PW 的平均值在 6 月、7 月和 8 月较高,分别为 30.67 mm、39.28 mm 和 34.23 mm。

4 降水分析与强对流指数

2014 年夏季蓟州出现了多次强降水事件,获取距蓟州站最近的 ERA5 格点资料,时间选择 08 时和 20 时,分析强对流指数与蓟州站随后 12 h 累计降水量的对应关系,探究 ERA5 在蓟州强降水分析中的

可用性。分析表 2 中 ERA5 的 CAPE 值与蕪州站累计降水量的相关系数,发现各月的相关系数不确定,在 4 月、5 月出现了负值,其余月均为正值,10 月相关系数最大,达到 0.351。各月 K 指数与降水的相关系数均为正,符合对流活动与 K 指数的对应关系,

即 K 指数越高,降水量越大,其中 5 月和 7 月相关系数数值较高,分别为 0.297 和 0.283;除 7 月外,PW 与降水的相关系数在 4 个强对流指数中最大,符合该物理量是大气水汽含量直接表达的事实,充分说明 PW 在强降水预报中具有很好的实用性。



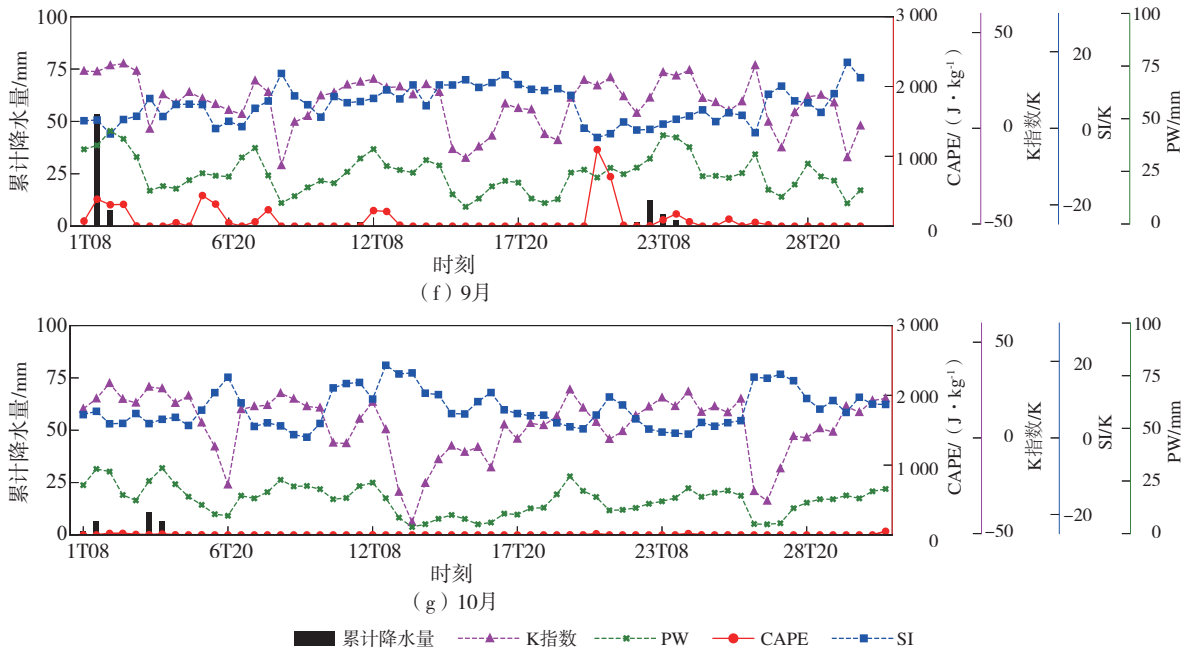
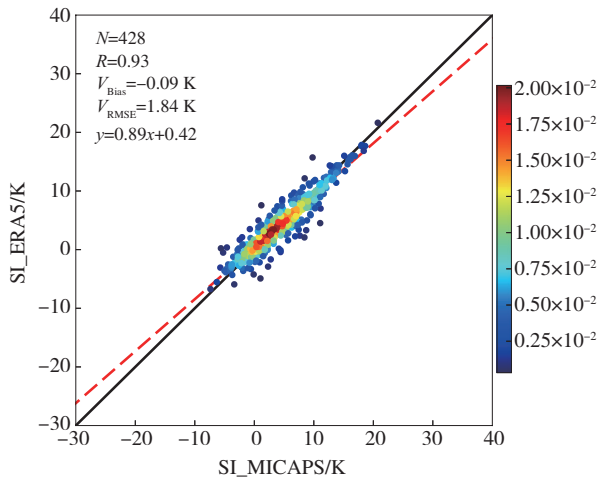


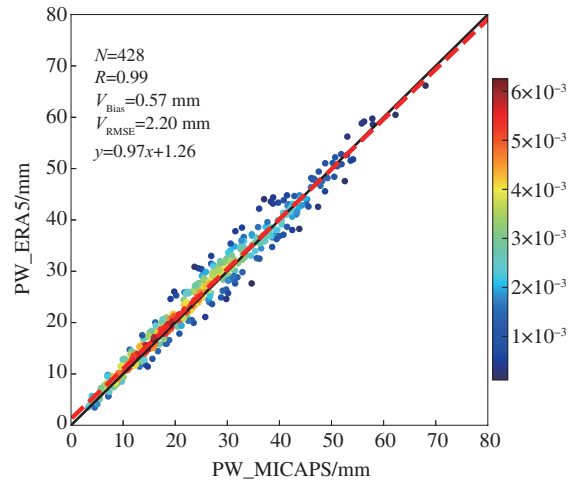
图6 2014年4—10月ERA5的强对流指数与蓟州站12 h累计降水量的变化
 Fig.6 Variation curve of strong convection indexes based on ERA5 and 12-h precipitation at Jizhou station from April to October 2014



黑色实线—线性1:1线; 红色虚线—线性拟合线; 色阶—散点密度。

图7 大兴探空站与ERA5同时次同位置SI散点密度分布

Fig.7 Scatter plot of SI at the same location and time from Daxing Sounding Station and ERA5



黑色实线—线性1:1线; 红色虚线—线性拟合线; 色阶—散点密度。

图8 大兴探空站与ERA5同时次同位置PW散点密度分布

Fig.8 Scatter plot of PW at the same location and time from Daxing sounding station and ERA5

表2 距蓟州站最近ERA5格点08时和20时的强对流指数和蓟州站随后12 h累计降水量的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between strong convection indexes at the nearest ERA5 grid point to Jizhou station at 08:00/20:00 and accumulated precipitation at Jizhou station 12 h later

| 强对流指数 | 相关系数 | | | | | | |
|-------|----------|----------|---------|----------|--------|----------|----------|
| | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 |
| CAPE | -0.028 | -0.078 | 0.232 * | 0.145 | 0.015 | 0.211 * | 0.351 ** |
| K 指数 | 0.216 | 0.297 * | 0.175 | 0.283 * | 0.132 | 0.211 | 0.252 * |
| SI | -0.043 | 0.201 * | -0.292 | -0.229 * | -0.074 | -0.201 | -0.132 |
| PW | 0.332 ** | 0.411 ** | 0.280 * | 0.190 | 0.270 | 0.373 ** | 0.401 ** |

注：“**”表示通过0.01显著性检验，“*”表示通过0.05显著性检验。

进一步研究强对流指数与降水关联性发现,蓟州站有明显降水过程发生之前,存在 CAPE 和 K 指数的峰值(图 6),但是降水峰值与强对流指数峰值并不能完全对应。检查蓟州2014年多次降水过程,ERA5 的强对流指数在过程中都有明显变化。以2014年6月6—7日的强降水过程为例(图 9),对比降水量与强对流指数逐小时变化曲线,发现蓟州站

过程累计雨量达65.6 mm,最大小时雨量为45.1 mm,对应平均 CAPE 为 $188.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CAPE 最高值为 $760.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。6日11时开始大气不稳定能量加速累积。14时降水发生,CAPE 值高达 $673.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。16时之后 CAPE 数值骤降,大气不稳定能量释放,降水以小雨量级为主。在降水趋于结束时,K 指数、SI 和 PW 开始有较明显变化。

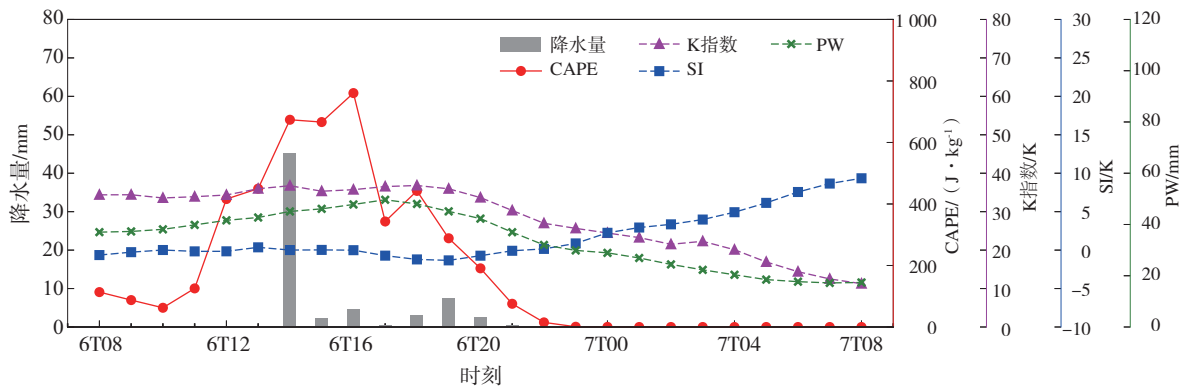


图 9 2014年6月6—7日蓟州强降水过程中 ERA5 的强对流指数与蓟州站逐小时降水量的变化
Fig.9 Variation of strong convection indexes based on ERA5 and hourly precipitation at Jizhou station during the heavy rainfall in Jizhou from 6 to 7 June 2014

基于以上个例可知 ERA5 的强对流指数与对流活动的发生有密切关系,能够指示和预警强降水的发生。随着降水临近,PW、CAPE、K 指数数值不断增大,说明大气中水汽充沛,不稳定能量不断积累,有利于强对流天气的发生。但是该地强降水发生并不能与强对流指数变化完全对应,究其原因,该地区降水多由积层混合云形成,积云降水和层云降水是不同的两类降水微物理过程的结果^[22],对于稳定性的层状云降水,通常强对流指数在降水前后数值变化较小。强对流指数能够反映大气层结不稳定和对流环境条件,但不是对流和强降水发展的唯一原因,降水的形成还与降水性质、风切变强度和局地地形等多因素有关。

5 结论

通过对比分析 ERA5 资料与大兴探空站资料在对流层高空基本气象要素以及 CAPE、K 指数、SI 和 PW 等相关的强对流指数,说明 ERA5 资料在复杂地形背景下蓟州的适用性,获得以下结论。

(1)以探空资料为真值的高空基本气象要素的检验结果表明:位势高度、气温和风速产品的平均廓线几乎重合,ERA5 资料能够反映基本气象要素的

垂直分布特征;由进一步的偏差分析看出,各层气温的平均偏差小于 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,中低层风速平均偏差在 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内。而代表湿度条件的物理量温度露点差的差异显著,在对流层高层最大达 $4.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。ERA5 资料对大气湿度的描述能力相对较差,将会影响对流指数产品精度。

(2)基于 ERA5 资料获取和生成的 CAPE、K 指数、SI 和 PW 与探空资料对应吻合,相关系数分别达 0.66、0.90、0.93 和 0.99,可以准确地反映当地对流层的不稳定特征。

(3)研究蓟州降水与强对流指数的联系发现,复杂地形下蓟州降水的发生与强对流指数的变化有较好的对应关系。PW 的峰值与降水峰值在时间轴上接近,其次是 SI、K 指数和 CAPE。各对流指数与蓟州的降水过程变化并不能完全对应,原因在于强对流特别是强降水物理过程复杂,受大气不稳定和地形等多种因素影响,不能由单一的因子决定。

参考文献:

- [1] 湛芸,孙军,徐珺,等.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,2012,38(10): 1255-1266.

- [2] 孙建华,赵思雄,傅慎明,等.2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征[J].大气科学,2013,37(3):705-718.
- [3] 孙军,谌芸,杨舒楠,等.北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J].气象,2012,38(10):1267-1277.
- [4] 齐道日娜,何立富,王秀明,等.“7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因[J].应用气象学报,2022,33(1):1-15.
- [5] 何秉顺.河南郑州山区4市2021年“7·20”特大暴雨灾害调查的思考与建议[J].中国防汛抗旱,2022,32(3):37-40,51.
- [6] 王秀明,俞小鼎,周小刚.雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J].气象,2014,40(4):389-399.
- [7] 张泽铭,刘强,张熙,等.一次低涡切变线引发的暴雨天气过程分析[J].山东气象,2011,31(3):10-14.
- [8] 俞小鼎,郑永光.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].气象学报,2020,78(3):391-418.
- [9] 赵海军,潘玲,毛子卿.山东省持续性短时强降水过程物理量特征分析[J].海洋气象学报,2023,43(1):63-74.
- [10] 刘玉玲.对流参数在强对流天气潜势预测中的作用[J].气象科技,2003,31(3):147-151.
- [11] TIAN F Y, ZHENG Y G, ZHANG T, et al. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and Eastern China[J]. J Meteorol Res, 2015, 29(3): 370-384.
- [12] 王迪,牛淑贞,曾明剑,等.河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J].气象,2020,46(5):618-628.
- [13] 王秀明,俞小鼎,朱禾.NCEP再分析资料在强对流环境分析中的应用[J].应用气象学报,2012,23(2):139-146.
- [14] 孙继松,陶祖钰.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,2012,38(2):164-173.
- [15] 郑媛媛,姚晨,郝莹,等.不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,2011,37(7):795-801.
- [16] JIANG Q, LI W Y, FAN Z D, et al. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland[J]. J Hydrol, 2021, 595:125660.
- [17] 熊明明,徐姝,李明财,等.天津地区小时降水特征分析[J].暴雨灾害,2016,35(1):84-90.
- [18] 邹双泽,白爱娟,袁淑杰,等.蓟州区半山地形下汛期短历时强降水特征研究[J].成都信息工程大学学报,2021,36(6):666-673.
- [19] 尉英华,花家嘉,王莹,等.近11年天津冰雹统计特征及对流参数指标分析[J].气象,2023,49(2):213-223.
- [20] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2020, 146(730):1999-2049.
- [21] 陆汉城,杨国祥.中尺度天气原理和预报[M].2版.北京:气象出版社,2004.
- [22] 李芳,李南,万瑜.台风“温比亚”影响山东期间GPM资料的降水分析[J].海洋气象学报,2020,40(4):69-76.