ERA5 再分析云量在大气环境评估中的适用性研究

许启慧[1] 张金龙[2*] 许康[1] 井元元[1]

（1 河北省气候中心，石家庄 050021；2 河北省气象信息中心，石家庄 050021）

摘要 以河北省 7 个国家级气象站为例，利用 1979—2013 年 ERA5 云量和地面实测云量数据，依国标推荐法计算混合层高度，通过公式推导出通风量和大气自净能力指数，比较两套数据的计算结果，对 ERA5 再分析云量在大气环境评估中的适用性进行了研究；采用 ERA5 云量计算 2013 年 3 月至 2021 年 2 月的大气自净能力指数，对其与 $PM_{2.5}$浓度之间的关系进行分析。结果表明：①两种云量资料计算的月平均混合层高度、通风量和大气自净能力指数的相对误差近似符合正态分布，主要集中在 0～5%；各月混合层高度：相对误差＞通风量＞大气自净能力指数，相关性则相反。秋冬季的相对误差（相关系数）大都低（高）于春夏季，邢台、石家庄和保定的误差明显小于其他站。②利用两种云量数据计算的大气自净能力指数的多年平均相对误差最小，通风量的次之，历年值的相关性和偏差也是中南部站点的更为理想。③2013 年 3 月至 2021 年 2 月，各站月平均大气自净能力指数和 $PM_{2.5}$浓度呈反向相关，中南部站点的相关性更为显著。

关键词 云量；ERA5；相对误差；大气自净能力指数

中图分类号：X16，P49 **DOI**：10.19517/j.1671-6345.20220181 **文献标识码**：A

引言

2013 年 1 月，我国东部出现跨区域、大范围的连续多天灰霾天气，区域性 $PM_{2.5}$ 污染严重[1-4]，河北更是重中之重。国务院迅速出台了《大气污染防治行动计划》（简称“大气十条”）[5-6]，实施污染减排措施，并全面开展大气污染的联防联控[7-8]。国内外的研究结果表明[9-13]，$PM_{2.5}$ 污染与静稳天气下的环流形势、相对湿度、大气稳定度、边界层高度[14-15]等气象要素密切相关，廖代强等[16]基于重庆逐日同期观测的气象要素和环境空气质量监测数据进行分析时指出，在特定区域假设污染源排放相对稳定的前提下，空气污染程度主要是各种气象因子共同作用的结果。朱丽等[17]在分析江苏泰州发生的一次较强污染过程中的气团后向轨迹特征发现，霾天气期间 500 m 以下气团稳定少动，而风力的增强并伴有降水的出现，利于污染过程的结束。近年来，有学者先后提出了区域大气环境容量[18]和大气自净能力指数（Atmospheric Self-cleaning ability Index，ASI）[19]的概念，旨在实现定量化评估气象条件对空气污染的作用。梅梅等[20]基于地面常规气象观测资料和 ERA-Interim 再分析资料等数据，采用大气自净能力指数建立了京津冀及周边“2＋26”城市秋冬季大气重污染气象条件等级判别方法；罗玉等[21]以成都为例，对 2017 年 1 月多次出现的持续性污染天气进行评估，结果表明大气自净能力指数可以部分表征大气扩散条件的优劣，对预报和评估大气污染潜势有重要指示意义；张天宇等[22]将重庆主城区的环境质量指标与大气自净能力指数进行对比分析，指出大气自净能力与 AQI 和 $PM_{2.5}$浓度存在日和月尺度上的显著反相关关系。

关于大气自净能力指数的计算，其推导方程中与气象条件有关的项主要是通风量和降水量，通风量定义为平均风速与混合层高度的乘积，目前多数研究采用国标推荐法[23]来计算混合高度，即利用地面气象观测站的云量和风速数据，通过计算太阳高

河北省气象局科研开发项目（19kyd01）、河北省地方十三五生态环境气象保障工程项目（201810979）共同资助

作者简介：许启慧，女，1985 生，硕士，高级工程师，主要从事气候评估与大气环境研究，Email：xuqihui859500@163.com

收稿日期：2022 年 4 月 22 日；定稿日期：2023 年 2 月 2 日

* 通信作者，Emai：jinlongzhang_001@qq.com

度角，查算帕斯奎尔大气稳定度等级计算出混合层高度。地面气象站关于云量的观测包括总云和低云，是一种现场的目视方法直接测量得到的数据[24]。2014 年之前，河北省仅 21 个国家基本(准)气象站进行逐日 4 次定时(02:00、08:00、14:00、20:00，下同)的人工云量观测，2014 年 1 月 1 日起，02:00 的人工观测被取消，改为逐日 3 次定时观测(08:00、14:00、20:00，下同)；2019 年 11 月开始，低云观测被取消，2020 年 4 月 1 日正式启动综合判识方法计算总云量和云高，自此地面气象站无低云观测，仅存综合判识的总云量和云高。因云量观测的变化，对继续采用常规气象站资料计算混合层高度带来了很大困难，解决这一问题最简单的办法就是能够有替代的云量资料。20 世纪 80 年代后期，科学家们提出了利用数值天气模式和资料同化方法来回算历史天气和气候的新方法，用该方法重建的全球历史气象资料，被称为“大气再分析数据集”[25]。新一代的大气再分析资料 ERA5 是欧洲中期数值预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts，ECMWF)[26]最新发布的第 5 代全球大气再分析产品，也是目前技术上领先的再分析产品。

本文以 ERA5 再分析资料中的云量为数据源，采用国标推荐法计算混合层高度，依相关公式推导出通风量和大气自净能力指数，与采用地面气象站云量数据计算的结果进行对比，研究是否可以用 ERA5 再分析云量代替实测云量数据，并结合河北省 2013 年开始的空气污染物浓度观测资料，分析大气自净能力指数与污染物浓度之间的关系，以期为污染气象条件的评估提供一定的参考。

1　数据说明

河北省共有 21 个国家基本(准)气象站，其中包含 7 个地级市所在气象站，由南向北分别为邢台、石家庄、保定、唐山、秦皇岛、承德和张家口(图 1)，云量的逐日 4 次定时观测截止至 2013 年 12 月，3 次定时观测截止至 2019 年 6 月。ERA5 云量数据为 1979—2021 年 2 月逐日 4 时次，分辨率为 0.25°×0.25°。将 ERA5 再分析格点云量数据插值到站点，对比使用双线性插值法和邻近站点匹配法，得出邻近站点匹配法的误差小，故优先采用邻近站点匹配法，即将距离测站位置最近的格点与站点一一匹配，当邻近格点数据缺测时，采用双线性插值获得站点数据。选取两套数据的共同时段 1979—2013 年进行混合层高度、通风量和大气自净能力指数的计算，并以逐日 4 时次平均作为日均值，基于日均值计算月均值和年均值，进而对比分析两套数据计算结果的差异。

自 2013 年开始，我国建立了覆盖范围较广的大气污染监测网络，实时监测包括 $PM_{2.5}$ 在内的 6 种常规污染物浓度。本文利用 ERA5 再分析云量计算所选 7 个站点 2013 年 3 月至 2021 年 2 月的大气自净能力指数，对其与 $PM_{2.5}$ 浓度之间的关系进行分析。

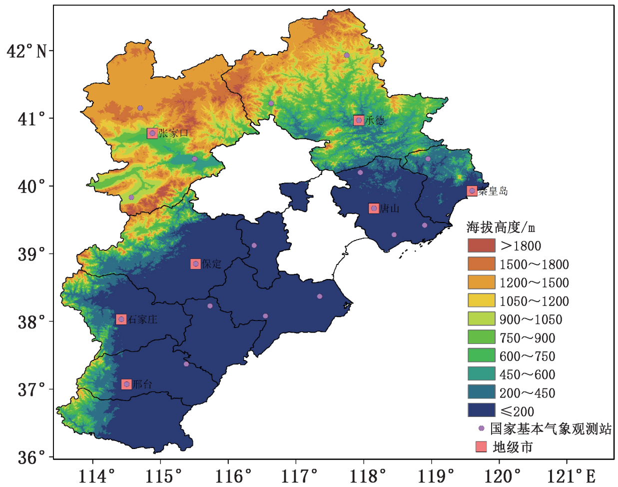


图 1　河北省国家基本气象站分布

2　方法介绍

2.1　大气自净能力指数的计算方法

利用朱蓉等[19]提出的公式计算所选站点的大气自净能力指数(ASI，A_{SI})。该指数可以较好地反映出大气运动对污染物的通风稀释作用和降水对污染物的湿清除作用，具体如下：

$$A_{SI} = 0.0864\left[\frac{\sqrt{\pi}}{2}V_E + \sum_{i=1}^{n}(170R\sqrt{S})\right]C_s/\sqrt{S} \tag{1}$$

式中，A_{SI} 为大气自净能力指数，单位：t/(d·km^2)；n 为一天中降水的小时数；R 为每小时降水量，单位：mm/h；面积 S 统一取值 100 km^2；C_s 为污染物标准浓度，这里取秋冬季主要污染物 $PM_{2.5}$ 二级空气质量标准 0.075 mg/m^3；$V_E = \bar{u}H_i$ 为大气通风量[27]，单位：m^2/s；$\bar{u}$ 为混合层内的平均风速，单位：m/s，H_i 为混合层高度，单位：m，计算方法采用国标推荐法[23]。

2.2　对比结果评估指标

为评价采用 ERA5 云量计算的混合层高度、通风量和大气自净能力指数的精度，分别对月和年的计算值与采用实测云量的计算值进行比较，利用线性相关系数分析两套数据计算结果的拟合程度，通过相对误差比较计算结果的偏离程度。具体评估指标的计算公式如下：

$$R_{\mathrm{E}} = \frac{L_{\mathrm{ERA5}} - L_{\mathrm{obs}}}{L_{\mathrm{obs}}} \times 100\% \tag{2}$$

$$R = \frac{\mathrm{Cov}(L_{\mathrm{ERA5}}, L_{\mathrm{obs}})}{\sqrt{\mathrm{Var}(L_{\mathrm{ERA5}})\mathrm{Var}(L_{\mathrm{obs}})}} \tag{3}$$

式中，R_{E}为相对误差（%）；L_{ERA5} 为采用 ERA5 云量计算的混合层高度、通风量或大气自净能力指数；L_{obs} 为采用实测云量计算的混合层高度、通风量或大气自净能力指数。R 为相关系数；$\mathrm{Cov}(L_{\mathrm{ERA5}}, L_{\mathrm{obs}})$为$L_{\mathrm{ERA5}}$与$L_{\mathrm{obs}}$的协方差，$\mathrm{Var}(L_{\mathrm{ERA5}})$为$L_{\mathrm{ERA5}}$的方差，$\mathrm{Var}(L_{\mathrm{obs}})$为$L_{\mathrm{obs}}$的方差[28]。

3　结果分析

3.1　相对误差分析

3.1.1　相对误差的区间分布频率

采用 ERA5 云量计算 1979—2013 年各站、每月（共 420 个值）的混合层高度、通风量和大气自净能力指数（以下简称 ASI），与采用实测云量计算结果之间的相对误差近似符合正态分布，其在 0～5% 出现频率最高（图 2），相对误差的绝对值越大，出现

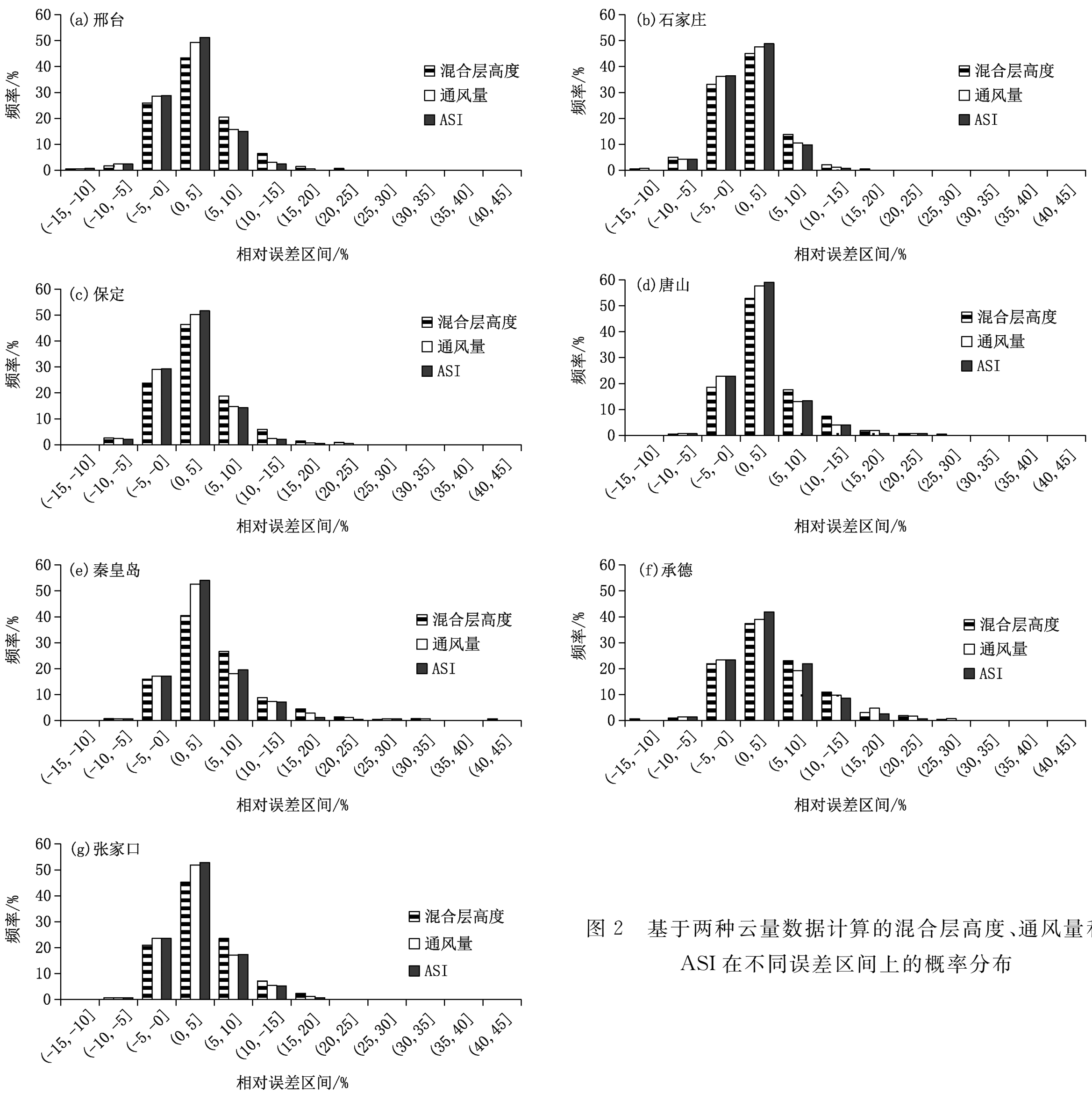
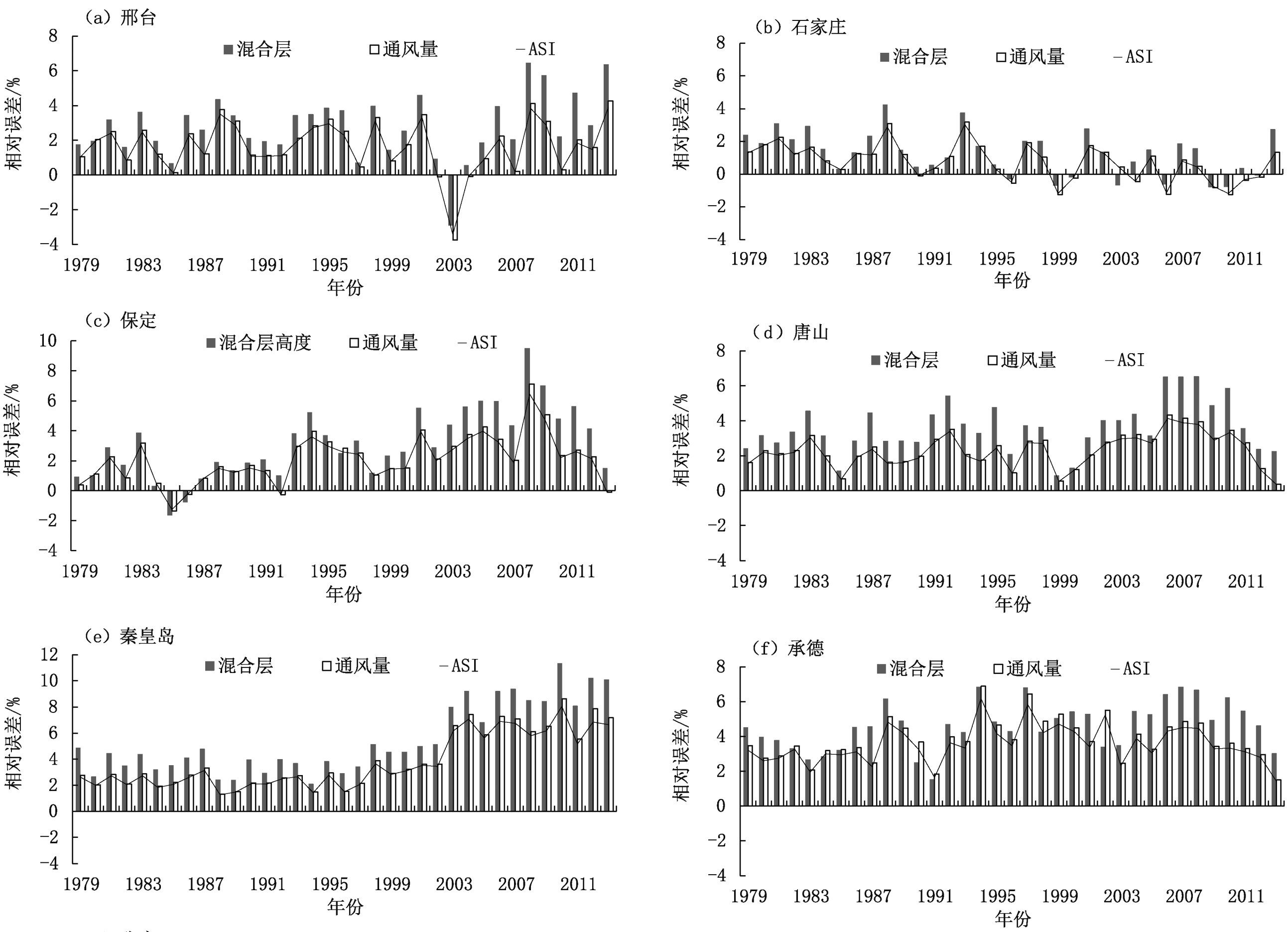


图 2　基于两种云量数据计算的混合层高度、通风量和 ASI 在不同误差区间上的概率分布

频率越低;邢台、石家庄、保定和唐山 4 站,各要素相对误差的次多频率区间为－5%～0,其中混合层高度和通风量的相对误差在－5%～5%的累计频率超过 70%,ASI 的高达 80%以上;秦皇岛、承德和张家口混合层高度的相对误差次高频率区间为 5%～10%,其中秦皇岛站混合层高度的相对误差分布较为分散,上限可达 30%以上,但出现频率很低,累计不足 1.0%。

3.1.2 相对误差的历年变化

基于两种云量数据计算 1979—2013 年间历年混合层高度、通风量和 ASI,比较历年值的相对误差可知,各站混合层高度的年平均相对误差在－2.91%～11.36%间波动,除石家庄站外,其他站以正误差为主,表明通过 ERA5 再分析云量数据计算的结果总体偏大,相对误差集中分布在 0～6%,最大值 11.36%出现在秦皇岛站的 2010 年,该站混合层高度的相对误差自 2003 开始表现出明显增大趋势,而其他各站混合层高度的相对误差多年均值明显低于 5%,其中石家庄最小,仅为 1.5%;各站通风量的年相对误差在－3.76%～8.64%,ASI 的在－3.44%～8.05%(图 3)。整体分析表明,利用两种云量数据计算的 ASI 最为接近,通风量次之,混合层高度差别最大。



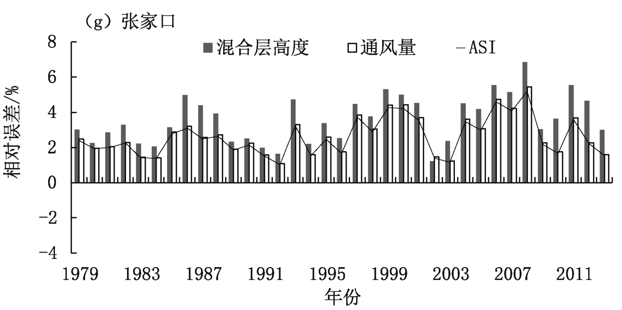


图 3 基于两种云量数据计算的混合层高度、通风量和 ASI 的年平均相对误差分布

表 1 为 1979—2013 年各站总(低)云量及采用不同云量数据计算的混合层高度、通风量和 ASI 的多年平均相对误差、相关系数统计结果，由表可知：实测总云量与 ERA5 总云量更为接近，相对误差明显低于低云量误差；采用两种云量计算的混合层高度、通风量和 ASI 的相对误差明显缩小，但相关系数明显增大，其数值均在 0.9 以上，表明利于 ERA5 云量数据计算的结果与实测云量计算结果的整体拟合程度更好，尤其是大气自净能力指数。

表 1 各站总(低)云量及采用不同云量数据计算的混合层高度、通风量和 ASI 的多年平均相对误差和相关系数

		石家庄	邢台	保定	唐山	秦皇岛	承德	张家口
混合层高度	年平均相对误差/%	1.28	2.76	3.11	3.62	5.45	4.63	3.60
	相关系数	0.992**	0.956**	0.981**	0.975**	0.977**	0.987**	0.992**
通风量	年平均相对误差/%	0.77	1.70	2.13	2.36	3.91	3.83	2.68
	相关系数	0.999**	0.996**	0.999**	0.999**	0.998**	0.999**	0.999**
ASI	年平均相对误差/%	0.73	1.60	2.06	2.25	3.70	3.54	2.59
	相关系数	0.999**	0.996**	0.999**	0.999**	0.998**	0.999**	0.999**
总云量	年平均相对误差/%	−10.58	−14.26	−11.90	−7.85	−2.37	2.07	−7.04
	相关系数	0.048	0.070	−0.043	0.257	0.305*	0.097	0.131
低云量	年平均相对误差/%	17.17	25.43	−24.28	−13.61	−52.31	−27.89	−24.61
	相关系数	0.514**	0.280*	0.540**	0.092	0.005	0.276*	0.125

注：** 通过 0.01 显著性检验，* 通过 0.1 显著性检验。

3.1.3 相对误差的季节变化

图 4 为利用两套云量数据计算混合层高度、通风量和 ASI 的相对误差逐月分布情况，由图可见，各要素月平均相对误差在−0.32%～11.74%间波动，且以正误差为主，各月混合层高度的相对误差＞通风量＞ASI；除邢台外，其他各地月平均相对误差自 1 月起整体先增大后减小，夏季 6—8 月相对误差较大，9 月之后开始减小，10 月至次年 3 月绝对值在 4.3%以内；邢台、石家庄和保定各月的平均相对误差较其他站明显偏小，特别是石家庄，月平均相对误差的最大值为 7 月的混合层高度(3.70%)，其他两站各要素的相对误差均在 8%以内。

分析各站利用两套云量数据计算结果的逐月相关系数分布发现(图 5)，ASI 的相关系数比混合层高度、通风量的都要高，数值在 0.95 以上，混合层高度的相关系数和通风量的相关系数各站不同月份的分布形势更为接近，其数值均在 0.8 以上，由此表明两套数据计算结果的拟合程度较高，这与表 1 的分析结果基本吻合。各站不同要素相关系数的低值主要出现在 3—9 月，秋冬季节的相关系数大都高于春夏季节；邢台不同要素的相关系数在大部分时间较其他地区明显偏小。各要素的相关系数更多地表现出时间上的差异，有较明显的季节变化。

3.2 ASI 与 $PM_{2.5}$ 的关系分析

自 2013 年起，河北省内先后建立多个环境质量监测站，本文选取上述 7 个城市 2013 年 3 月至 2021 年 2 月逐月空气质量监测的 $PM_{2.5}$ 浓度数据，利用同期的 ERA5 云量数据计算各地的大气自净能力指数，对其与 $PM_{2.5}$ 浓度之间的关系做进一步分析，以期为污染气象条件的评估提供一定的参考依据。统计中使用的“年”并非自然年，而是一年的 3 月到下一年 2 月的“季节年”，涵盖一个完整的四季，其中春季是 3—5 月，夏季是 6—8 月，秋季是 9—11 月，冬季是 12 月到来年 2 月。

ASI 与 $PM_{2.5}$ 浓度呈反向相关，其中位于中南部的邢台、石家庄、保定和唐山 4 站相关性显著，均通过了 0.01 的显著性检验水平(表 2)，说明 ASI 能够很好地表征区域大气对 $PM_{2.5}$ 污染物的清除能力。春、夏季月份，ASI 水平高，$PM_{2.5}$ 浓度低，秋、冬季则相反，两者的季节波动明显。秋、冬季，2013 年和 2016 年 ASI 较低，$PM_{2.5}$ 浓度较高，月 $PM_{2.5}$ 浓度的极高值主要集中在这两年(图 6)；2017 年之后，京津冀及周边地区空气质量有明显改善，这其中除较好的气象条件对空气质量好转起到一定的促进作用外，地方的减排措施也发挥了关键作用，这从 ASI 和 $PM_{2.5}$ 浓度月值的变化趋势也可以看出(表 2)；各

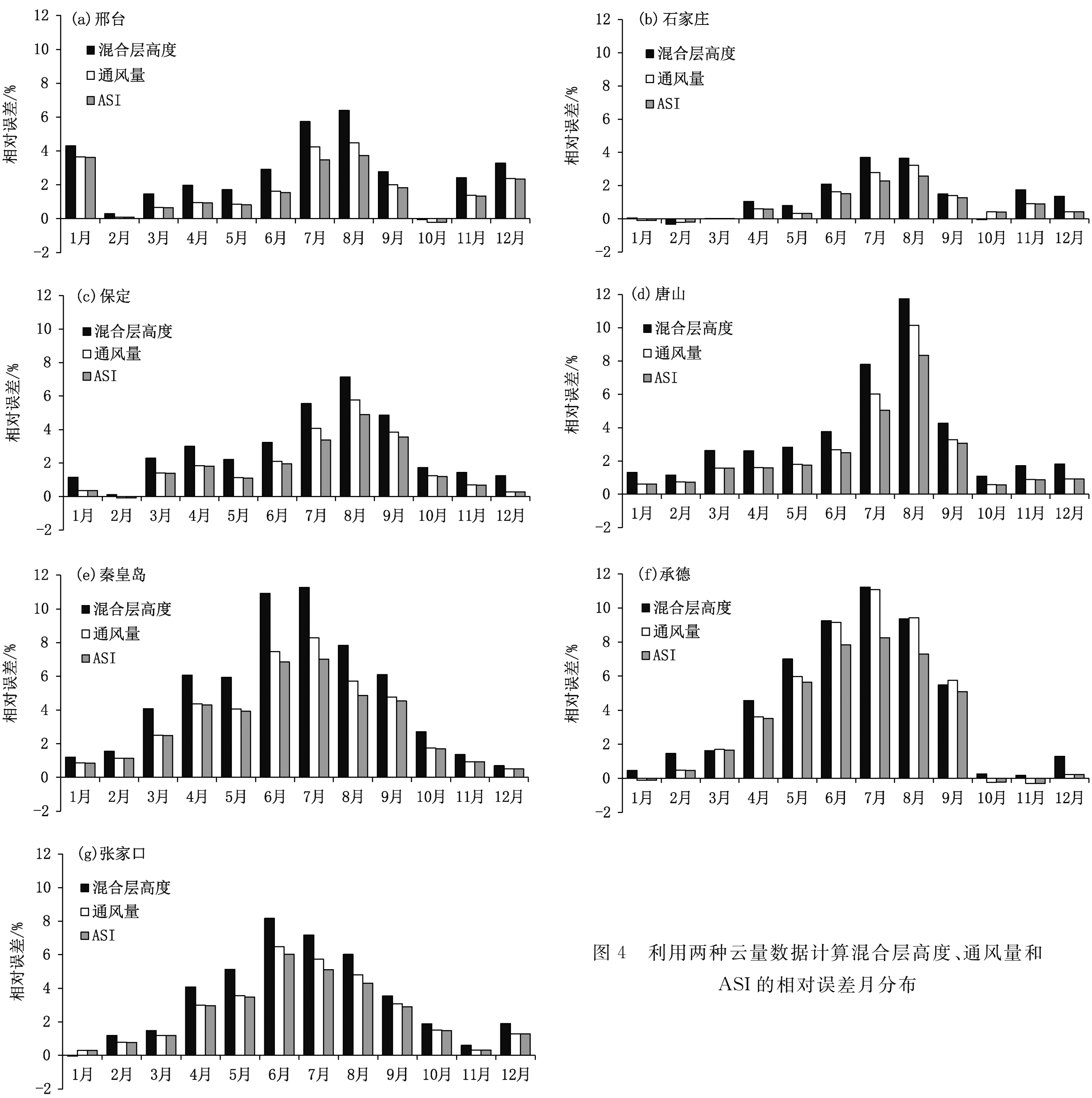


图 4　利用两种云量数据计算混合层高度、通风量和 ASI 的相对误差月分布

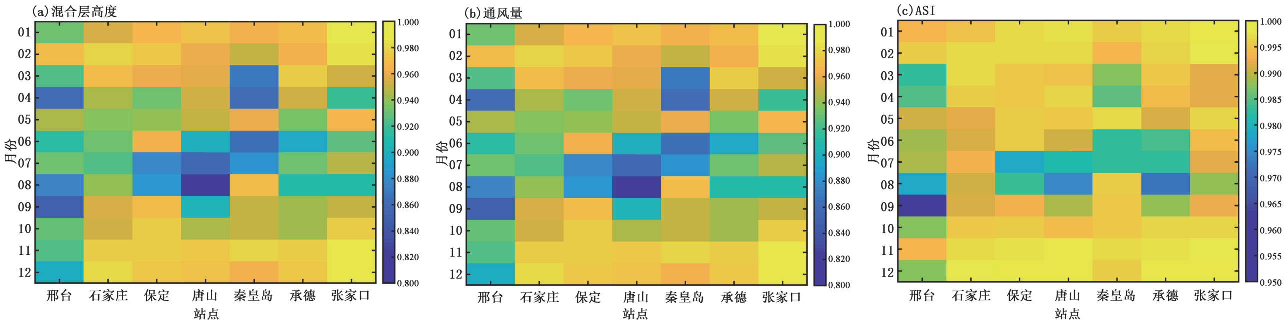


图 5　各站采用两种云量数据计算混合层高度、通风量和 ASI 的相关系数月分布

表 2　各站 ASI 与 $PM_{2.5}$ 浓度的月变率及相关系数

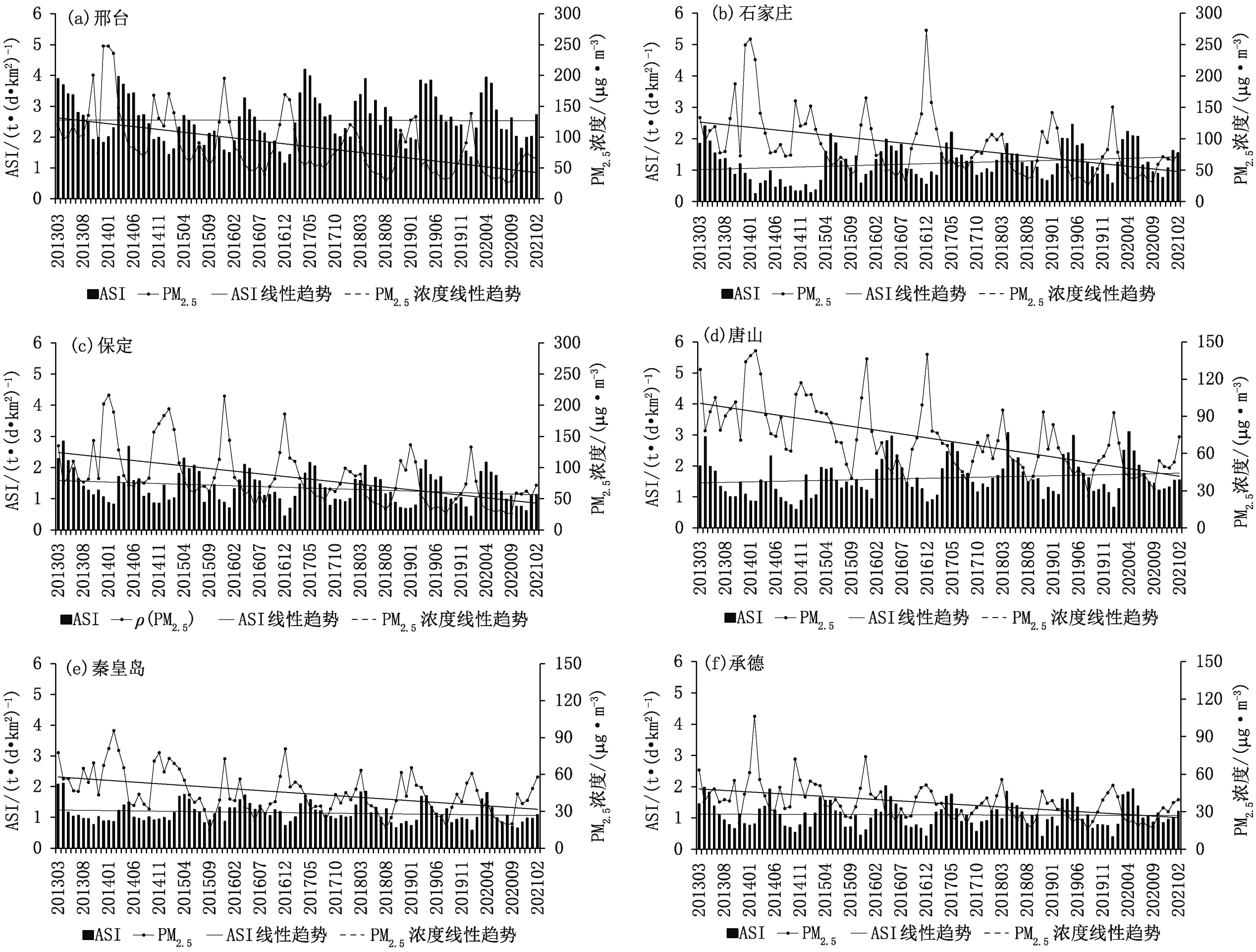
站名	ASI $t \cdot d^{-1} \cdot km^{-2}$	$PM_{2.5}$ $\mu g \cdot m^{-3}$	相关系数
邢台	0.000	−0.935	−0.389**
石家庄	0.004	−0.830	−0.523**
保定	−0.005	−0.852	−0.348**
唐山	0.003	−0.617	−0.417**
秦皇岛	−0.002	−0.277	−0.038
承德	−0.001	−0.242	−0.305*
张家口	−0.006	−0.109	−0.145

注：** 通过 0.01 显著性检验，* 通过 0.05 显著性检验。

站 $PM_{2.5}$ 浓度均呈明显的减小趋势（通过 0.01 显著水平），中南部站点递减率明显偏大，邢台 −0.935 为所有站中最大，保定次之，石家庄位居第 3；保定和张家口的 ASI 整体呈显著降低趋势（通过 0.01 显著水平），石家庄呈微弱的增大趋势，其他站则无明显升降变化。

4　结论与讨论

以河北省 7 个所属市的国家基本气象站为例，利用 1979—2013 年 ERA5 再分析云量和实测云量



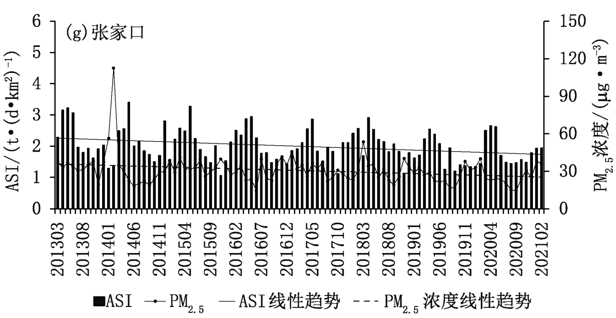


图 6　2013 年 3 月至 2021 年 2 月不同站逐月平均 ASI 和 $PM_{2.5}$ 浓度的分布

数据计算混合层高度、通风量和 ASI，分别从月、季和年的时间尺度对比两套数据的计算结果，对 ERA5 再分析云量在大气环境评估中的适用性进行了初步评估。之后采用 ERA5 云量计算各站 2013 年 3 月至 2021 年 2 月的 ASI，对其与 $PM_{2.5}$ 浓度之间的关系进行分析。主要结论如下：

(1)两套云量资料计算的月平均混合层高度、通风量和 ASI 之间的相对误差近似符合正态分布，其在 0～5%区间出现频率最高，绝对值越大，出现频率越低；邢台、石家庄、保定和唐山 4 站，各要素相对误差的次多频率区间为－5%～0；秦皇岛、承德和张家口混合层高度的相对误差次高频率区间为 5%～10%。

(2)各月混合层高度：相对误差＞通风量＞ASI，相关系数则相反；除邢台外，其他各地月平均相对误差自 1 月开始呈先增大后减小的变化形势，夏季 6—8 月相对误差较大，9 月之后开始减小；邢台、石家庄和保定的月平均相对误差较其他站明显偏小。各站逐月混合层高度、通风量的相关系数分布形势更为接近，其数值均在 0.8 以上；不同要素相关系数的低值主要出现在 3—9 月，秋、冬季的相关系数大都高于春、夏季。

(3)通过两套云量数据计算的 ASI 最为接近，其年平均相对误差最小，通风量的次之，混合层高度的最大。各站混合层高度的历年相对误差在－2.91%～11.36%之间波动，通风量的在－3.76%～8.64%，ASI 的在－3.44%～8.05%；除石家庄站外，其他站各要素的历年相对误差以正值为主，表明通过 ERA5 再分析云量数据计算的结果总体偏大，相对误差集中分布在 0～6%。两套数据计算结果的年际变化拟合程度较高，相关系数均在 0.9 以上，并且位于中南部的保定、石家庄和邢台相关性更好、偏差更小。

(4)2013 年 3 月至 2021 年 2 月，各站月平均 ASI 和 $PM_{2.5}$ 浓度呈反向相关关系，位于中南部的邢台、石家庄、保定和唐山 4 站，相关性均通过了 0.01 的显著性检验水平。春、夏季月份，ASI 水平高，$PM_{2.5}$ 浓度低，秋冬季则相反，两者的季节波动明显，表明 ASI 能够很好地表征区域大气对 $PM_{2.5}$ 污染物的清除能力。

ERA5 再分析云量资料覆盖范围广、数据时间尺度更精密，在地面气象站观测云量全面取消的大背景下，可以考虑采用 ERA5 再分析云量数据来替代实测云量进行大气环境评估中相关参数的计算，特别是在河北省中南部区。此外，本文仅选取了 7 个地面气象观测站进行分析，存在一定的局限性，后续将开展河北全省范围的 ERA5 再分析云量的适用性研究。

参考文献

[1] Chen Yang, Tian Mi, Huang Ru'in, et al. Characterization of urban amine-containing particles in southwestern China: seasonal variation, source, and processing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(5): 3245-3255.

[2] Zhao P S, Dong F, He D, et al. Characteristics of concentrations and chemical compositions for $PM_{2.5}$ in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(9): 4631-4644.

[3] Yang F, Tan J, Zhao Q, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ speciation in representative megacities and across China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(11): 5207-5219.

[4] Yan Renchang, Yu Shaocai, Zhang Qingyu, et al. A heavy haze episode in Beijing in February of 2014: characteristics, origins and implications [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015, 6(5): 867-876.

[5] 王文兴，柴发合，任阵海，等. 新中国成立 70 年来我国大气污染防治历程、成就与经验[J]. 环境科学研究，2019，32(10)：1621-1635.

[6] 张小曳，徐祥德，丁一汇，等. 2013—2017 年气象条件变化对中国重点地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降的影响[J]. 中国科学：地球科学，2020，50(4)：483-500.

[7] Wang Lili, Liu Zirui, Sun Yang, et al. Long-range transport and regional sources of $PM_{2.5}$ in Beijing based on long-term observations from 2005 to 2010 [J]. Atmospheric Research, 2015,157: 37-48.

[8] Hu Jianlin, Wu Li, Zheng Bo, et al. Source contributions and regional transport of primary particulate matter in China [J]. Environmental Pollution, 2015, 207: 31-42.

[9] Elminir H K. Relative influence of air pollutants and weather conditionson solar radiation: part 1. Relationship of air pollutants with weather conditions [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 96: 245-256.

[10] Wu Jian, Wen Chen, YI Lin, et al. The emission inventory atmospheric industrial pollution sources of the five cities in Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2014, 12(2): 185-188.

[11] Wang Yuesi, Yao Li, Wang Lili, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 14-25.

[12] 王晨曦，王维佳，桂海林，等. 边界层动力过程对成都冬季细颗粒物污染事件的影响[J]. 气象科技，2021，49(6)：942-952.

[13] 黄少妮，孟金平，杜莉丽，等. 陕西关中两次霾重污染过程气象条件分析[J]. 气象科技，2019，47(5)：809-817.

[14] 孙艺，林倩. 山东一次大范围持续性霾过程的气象条件分析[J]. 气象科技，2020，48(2)：292-298.

[15] 田野,刘旭林,于永涛,等. 北京城区大气边界层高度的反演研究[J]. 气象科技,2022,50(1):9-20.
[16] 廖代强,吴遥,柴闯闯. 大气污染物非线性回归模型构建[J]. 气象科技,2020,48(6):871-876.
[17] 朱丽,张庆池,王琴,等. 2020 年江苏泰州一次持续性雾—霾过程特征和成因分析[J]. 气象科技,2022,50(2):243-253.
[18] 徐大海,王郁. 确定大气环境承载力的烟云足迹法[J]. 环境科学学报,2013,33(6):1734-1740.
[19] 朱蓉,张存杰,梅梅. 大气自净能力指数的气候特征与应用研究[J]. 中国环境科学,2018,38(10):3601-3610.
[20] 梅梅,朱蓉,孙朝阳. 京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究[J]. 气候变化研究进展,2019,15(3):270-281.
[21] 罗玉,陈超,张天宇,等. 1981—2017 年四川省大气自净能力变化特征分析[J]. 中国环境科学,2021,41(2):527-536.
[22] 张天宇,张丹,王勇,等. 1951—2018 年重庆主城区大气自净能力变化特征分析[J]. 高原气象,2019,38(4):901-910.
[23] 国家技术监督局,国家环境保护局. GB/T 3840－1991 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S]. 北京:中国标准出版社,1991.
[24] 张鑫,刘志邦,霍延风,等. 2015—2020 年全国地面气象观测装备运行能力评估[J]. 气象科技,2022,50(4):494-499.
[25] 叶梦姝. 中国大气再分析资料降水产品在天气和气候中的适用性研究[D]. 兰州:兰州大学,2018.
[26] 单帅,师春香,沈润平,等. EAR70、CLDAS 和 ERA-Interim 表层土壤温度在中国地区的评估[J]. 气象科技,2021,49(6):830-837.
[27] 许启慧,范引琪,井元元,等. 1972—2013 年河北省大气环境容量的气候变化特征分析[J]. 高原气象,2017,36(6):1682-1692.
[28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.

Research on Applicability of ERA5 Reanalysis Cloud Cover in Assessment of Atmospheric Environment

XU Qihui[1]　ZHANG Jinlong[2]　XU Kang[1]　JING Yuanyuan[1]
(1 Hebei Climate Centre, Shijiazhuang 050021; 2 Hebei Meteorological Information Centre, Shijiazhuang 050021)

Abstract: Taking seven national weather stations in Hebei Province as an example, the mixed layer height, ventilation capacity and atmospheric self-cleaning ability index are calculated using ERA5 cloud data and measured cloud data from 1979 to 2013, and a preliminarily assessment of ERA5 reanalysis cloud data is conducted through comparing the results by two sets of data calculated. ERA5 cloud cover is used to calculate the atmospheric self-cleaning capacity index from March 2013 to February 2021, and the relationship between it and $PM_{2.5}$ concentration is analyzed. The results are as follows: (1) The monthly average relative errors between the mixed layer height, ventilation capacity, and atmospheric self-cleaning ability index calculated by using two sets of cloud data approximately accord with the normal distribution, the highest frequency occurring in 0－5%; the monthly relative error of the mixed layer height > ventilation capacity > atmospheric self-cleaning ability index; and the correlation is opposite. The relative errors (correlation coefficients) of autumn and winter are mostly lower (higher) in spring and summer. The monthly mean relative errors of Xingtai, Shijiazhuang and Baoding are significantly smaller than those of other stations. (2) The annual average relative error of the atmospheric self-cleaning ability index is the smallest, followed by ventilation capacity. The fitting degree and deviation of the annual values in the south-central stations are also more ideal. (3) From March 2013 to February 2021, the monthly average atmospheric self-cleaning ability index and $PM_{2.5}$ concentration are inversely correlated at all stations. The correlativeness is more obvious in the central and southern stations.

Keywords: cloud cover; ERA5; relative error; $PM_{2.5}$; atmospheric self-cleaning ability index