

孟庆涛. 2019. 沙尘预报客观检验中最优实况资料和圆插值半径选择研究 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 735-740. MENG Qingtao. 2019. Research on the Selection of the Optimal Observations and Radius of Circular Interpolation during Objective Verification of Sand-Dust Forecasts [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 735-740. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18082

# 沙尘预报客观检验中最优实况资料和 圆插值半径选择研究

孟庆涛

国家气象中心, 北京 100081

**摘要** 使用2012~2014年每年3~5月CUACE (China Meteorological Administration Unified Atmospheric Chemistry Environment) 模式地面沙尘浓度格点预报产品, 预报员预报等级产品、实况地面观测沙尘等级和特征站观测PM10 (空气动力学当量直径小于等于10  $\mu\text{m}$  的颗粒物, 即可吸入颗粒物) 资料, 并针对CUACE模式格点产品, 选取不同半径对格点产品进行圆插值, 从而对2012~2014年共25次沙尘过程值, 采取3年总样本计算TS (Threat Score) 评分, 对格点产品适合的圆插值半径和预报产品适合的检验实况资料进行研究, 结论如下: (1) 如实况采用沙尘等级, 模式插值半径与TS评分在浮尘或扬沙等级成近似线性下降关系, 而在沙尘暴以上等级TS评分与插值半径关系几乎不大, 最优插值半径可选为最小插值半径 $0.5^\circ$  (经度/纬度); 如实况采用PM10资料, TS评分在浮尘或扬沙等级根据半径不同变化较为剧烈, 沙尘暴以上等级TS评分与插值半径关系不大, 可以采用浮尘或扬沙平均线 $3.5^\circ$ 为平均最优插值半径。如果沙尘过程较弱, 插值半径可适当减小, 以 $1^\circ$ 最合适; (2) 对CUACE模式预报产品, 沙尘等级观测TS评分可用性要优于PM10资料, 但两者在沙尘暴以上等级评分差别不大, 总体上CUACE模式最优检验实况资料可选为沙尘等级观测资料。对预报员沙尘预报产品, 观测沙尘等级TS评分要远高于PM10, 预报员沙尘预报产品最优检验实况资料为观测沙尘等级资料。

**关键词** 沙尘 检验 圆插值 最优插值半径 适合检验实况资料

文章编号 1006-9585(2019)06-0735-06

中图分类号 P425.5\*5

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18082

## Research on the Selection of the Optimal Observations and Radius of Circular Interpolation during Objective Verification of Sand-Dust Forecasts

MENG Qingtao

National Meteorological Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

**Abstract** Utilizing the ground sand concentration net grid products forecasted by the China Meteorological Administration (CMA) Unified Atmospheric Chemistry Environment (CUACE) numerical model, human forecasts of sand-dust rank products, observed ground sand-dust rank, and the observed particulate pollution (PM10), this paper calculated the Threat Score (TS) from 2012 to 2014, which contained a total of 25 processes of sand-dust weather, to select the best observations and radii of circular interpolation for an objective verification of the sand-dust forecast. For the net grid CUACE numerical model products, different radii were chosen by using the circular interpolation to generate the interpolated station sand-dust forecast. Several conclusions were drawn from the study results: (1) For the sand-dust rank observations, the radii approximately linearly declined with TS in the float dust-dust rank; the TS rarely changed

收稿日期 2018-06-26; 网络预出版日期 2019-10-26

作者简介 孟庆涛, 男, 1986年出生, 工程师, 主要从事中小尺度灾害性天气分析和研究。E-mail: mengqt@cma.gov.cn

资助项目 国家气象中心预报员专项Y201517

Funded by the Forecaster Program of the National Meteorological Center of China Meteorological Administration (Y201517)

when the radius changed in the sand-dust rank above the sandstorm, and the best radius selected was the minimum radius, i. e.,  $0.5^\circ$  (longitude/latitude). For the PM10, the TS changed markedly when the radius changed in the float dust, but rarely changed when the radius changed in the sand rank above the sandstorm, when the best radius selected averaged  $3.5^\circ$ . If the sand was very weak, the radius could be properly decreased to  $1^\circ$ . (2) For the CUACE numerical model product, the usability of the TS of the observed sand-dust rank was better than the observed PM10, while the two were nearly the same in rank above the sandstorm. Thus, the best observation used for the objective verification of the CUACE numerical model product, generally, was observed ground sand rank. For the human sand rank forecast, the TS of the observed ground sand-dust rank was much higher than the PM10, and the best observation for the verification was the observed ground sand rank.

**Keywords** Sand-dust, Verification, Circular interpolation, The best radius of interpolation, The best observation for the objective verification

## 1 引言

传统气象业务预报产品的检验工作主要是利用(或选择)代表性良好的实况资料,采用合适(准确)的检验方法,如TS(Threat Score)评分,计算实况资料和预报产品之间的差异,对结果进行统计分析,从而得到预报产品预报性能“好坏”的判断(Brooks et al., 2015)。对现有业务产品进行检验时,依据检验对象本身特征,检验工作可划分为以降水为代表的大概率预报事件检验和以沙尘暴为代表的小概率预报事件检验。

对降水这类大概率预报事件,预报产品直接给出检验对象结果,检验需要的实况资料也属于直接观测项目,观测对象即是检验对象,同时由于实况资料历史跨度大,站点密集,故能形成匹配性很好的预报和实况检验资料。对这类预报产品的检验,国内外研究开展很早(Brooks et al., 2015),由于检验资料代表性的选择没有太大难度,研究内容多数集中在检验方法的优劣和检验结果的分析,最为普遍的检验方法是TS评分,为大多数业务或研究单位采用,以TS评分为标准的降水业务检验已在我国各级气象预报台站开展多年并运行良好。

但是,对沙尘这类小概率预报事件,检验工作难度陡升。国内外针对沙尘检验的研究不多,即使世界气象组织巴塞罗那沙尘暴区域预警专业中心对沙尘暴的检验多数也局限于定性比较(Terradellas et al., 2013),国内对沙尘的检验多数也以沙尘过程的主观定性比较为主(Meng et al., 2012; 陈豫英等, 2016; 刘辉等, 2008; 孙钦宏等, 2012),客观检验研究很少(段海霞等, 2016)。检验难度的增加主要来源于两个方面:第一,检验所需预报

和实况资料本身匹配性问题。由于沙尘本身发生概率不大,且沙尘浓度历来不是各级气象台站的直接观测项目,各级气象台站对沙尘的观测开展时间跨度也较大,合适且具有代表性的沙尘实况资料存在站点稀疏,资料时间跨度短和连续性差的问题;此外,对沙尘的观测以能见度、气溶胶和沙尘主观等级等间接观测为主,而业务预报产品以沙尘等级(预报员主观预报)和沙尘浓度(模式产品)为主,预报产品(沙尘浓度)与实况资料(如能见度、气溶胶等)之间的对应关系标准也很少,大多数以经验公式来近似表达,多数研究较为困惑的问题集中在哪种沙尘实况资料更具有代表性(如地面观测能见度、沙尘等级、特征站观测PM10等)(Terradellas et al., 2013; Meng et al., 2012)。第二,客观检验难度大。国内外对沙尘这类小概率预报事件的客观检验方法很少(段海霞等, 2016),或者干脆没有,多数业务单位和机构直接采用已有检验方法,国家气象中心沙尘业务也以TS评分为主。TS评分本身依赖样本的代表性,检验样本基数越大,评分结果一般误差越小。沙尘观测站点稀疏,单次沙尘过程可供检验的站点样本较少,一般来说单次沙尘过程TS评分分数很小( $<0.1$ ),TS评分对比性不明显,这种情况在对低密度空间分布的实况和相对高密度的格点预报进行检验时尤为明显,有时TS评分甚至低于0.01。为加大评分结果可用性,需要对预报值进行加密插值,加密插值方法较多,对沙尘这类特稀疏站点(单站距离最大可超过数百公里)以圆半径插值方法较为合适,选取合适的插值半径可以提高低密度实况的代表性。可见只有解决上述两个问题,沙尘客观检验结果才具有和降水检验接近的参考价值。

## 2 资料及处理方法

本文预报产品资料采用2012~2014年每年3~5月CUACE (China Meteorological Administration Unified Atmospheric Chemistry Environment) 模式预报地面沙尘浓度格点产品和预报员预报等级产品, 不同预报产品给出的预报要素不同。

CUACE模式特指中国气象局国家级雾霾数值预报业务系统, 该系统以上次预报的沙尘浓度作为沙尘气溶胶初值, 以三维变分资料同化系统3DVAR同化常规观测和卫星观测反演资料, 模式预报给出的是 $DM_{40}$ 浓度(空气动力学直径大于或等于 $40\ \mu\text{m}$ 的粒子浓度)(Zhou. et al., 2008; 姜金荣等, 2010)。

预报员预报等级产品是现行国家级沙尘业务预报中给出的是沙尘暴等级预报产品, 产品预报等级分为扬沙或浮尘、沙尘暴和强沙尘暴3个等级, 其分别对应预报能见度范围为1~10 km, 小于1 km和小于0.5 km。实况地面观测资料采用2012~2014年每年3~5月地面观测沙尘等级和特征站观测 $PM_{10}$ 资料。地面沙尘观测等级是指地面常规观测, 观测要素为天气现象编码, 与沙尘相关的天气现象编码范围在6~35, 具体天气编码表与沙尘等级对应关系见表1。

与沙尘现象相关的特征站观测要素主要是 $PM_{10}$ (直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 可吸入颗粒物)浓度(刘克利等, 2008; 邱雪等, 2015), 全国观测特征站共18站, 分布范围包含我国北方偏北大部地区, 具体分布为: 南疆3站(塔中、和田和哈密), 甘肃西部到内蒙大部9站(额济纳旗、敦煌、酒泉、民勤、朱日和、乌特拉中旗、东胜、锡林浩特和通辽), 华北到东北6站(大同、榆社、延安、北京、大连和惠民)。在每年春季沙尘发生高峰期, 我国北方地区, 特别是西北地区近沙漠区域, 观测的 $PM_{10}$ 颗粒物成分主要由矿物质沙尘颗粒组成, 矿物质沙尘颗粒浓度可达观测 $PM_{10}$ 浓度的50%到60%以上, 统计意义上通常采取 $PM_{10}/0.8$ 作为近似地面观测沙尘浓度(Zhang et al., 2012)。

考虑到预报检验主要是对比预报员与客观预报产品预报能力的优劣, 有必要把预报员主观预报和客观预报统一到沙尘等级强度上。预报员主观预报沙尘等级作为基础等级, 实际检验中针对沙尘的检验一般分为3个等级检验, 分别为浮尘或扬沙、沙

表1 天气编码表与沙尘等级对应关系

Table 1 Corresponding relationship between weather code and sand-dust ranks

天气编码	沙尘等级
6、7、8	浮尘或扬沙
9、30、31、32	沙尘暴
33、34、35	强沙尘暴

表2 沙尘暴数值预报系统输出 $DM_{40}$ 浓度与沙尘等级对应关系

Table 2 Corresponding relationship between the concentrations of  $DM_{40}$  particle outputted by the sandstorm numerical predicting system and sand-dust ranks

沙尘暴数值预报系统输出的 $DM_{40}$ 浓度/ $\text{ug m}^{-3}$	沙尘等级
$DM_{40}$ 浓度 < 2000	浮尘或扬沙
$2000 \leq DM_{40}$ 浓度 < 5000	沙尘暴
$5000 \leq DM_{40}$ 浓度 < 20000	强沙尘暴

尘暴和强沙尘暴。

根据中华人民共和国国家标准《GBT20479-2006沙尘暴天气监测规范》(中国气象局, 2006), 预报浓度类模式产品与沙尘等级之间关系如表2所示, 即 $DM_{40}$ 浓度与沙尘等级之间存在统计对应关系,  $DM_{40}$ 浓度小于 $2000\ \text{ug/m}^3$ 为浮尘或扬沙,  $DM_{40}$ 浓度大于等于 $2000\ \text{ug/m}^3$ 且小于 $5000\ \text{ug/m}^3$ 为沙尘暴,  $DM_{40}$ 浓度大于等于 $5000\ \text{ug/m}^3$ 且小于 $20000\ \text{ug/m}^3$ 为强沙尘暴, 实际检验中模式预报浓度产品预报网格点浓度按此对应到沙尘等级上即可。

## 3 最优插值圆半径选择

针对CUACE模式预报地面沙尘浓度格点产品和预报员预报等级产品, 交叉选择地面观测沙尘等级和特征站观测 $PM_{10}$ 资料计算TS评分。对每类预报产品, 统计实况种类与TS评分对应关系, 选取最大评分对应的种类为该预报产品最优实况种类。其中, 统计TS评分定义如下:

$$T_s = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C}, \quad (1)$$

其中,  $T_s$ 表示TS评分,  $N_A$ 代表该等级预报正确(NA)站数,  $N_B$ 表示该等级预报漏报(NB)站数,  $N_C$ 表示该等级空报(NC)站数, 沙尘暴数值预报分级检验中NA、NB、NC的具体定义详见表3。

对于 CUACE 模式预报地面沙尘浓度格点产品, 由于实况站点相对格点密度较为稀疏, 需要对预报格点值进行加密插值, 以便使得检验站点预报信息尽可能反映站点相邻网格点预报值, 本文加密插值方法采取圆半径插值方法 (图 1) 进行插值。具体插值方法如下: 以观测站点为圆心, 选取不同半径, 将每个半径所形成的圆覆盖的所有预报格点预报值最大值视为该半径对应的站点预报值, 以上述插值形成的站点预报值与实况计算 TS 评分, 统计不同半径和对应的 TS 评分关系, 以最大 TS 评分对应的半径为该预报产品的最优圆插值半径。



图1 圆半径插值示意图。 $R$ 为半径 (单位: 经度/纬度)  
Fig. 1 Sketch map of the circular interpolation.  $R$  represents the radius (longitude/latitude)

表3 沙尘暴数值预报分级检验

Table 3 Rank verification of the sandstorm numerical prediction

	强沙尘暴 (实况)	沙尘暴 (实况)	浮尘或扬沙 (实况)	无(实 况)
强沙尘暴(预报)	NA	NC	NC	NC
沙尘暴(预报)	NB	NA	NC	NC
浮尘或扬沙(预报)	NB	NB	NA	NC
无(预报)	NB	NB	NB	

## 4 TS评分结果分析

本文预报产品采用 2012~2014 年每年 3~5 月的逐 3 h CUACE 模式预报地面  $DM_{40}$  浓度预报产品 (模式浓度挑选提前 36 h 起报的 24 h 内 3 h 间隔最大值作为预报浓度) 和 2012~2013 年预报员沙尘等级预报产品; 实况产品采用 2012~2014 年每年 3~5 月的地面观测沙尘等级和特征站观测 PM10 资料, 采用每天 08:00 (北京时间, 下同) 前 24 h 内最大值作为实况沙尘等级或 PM10 浓度。这样做严格上有一些差异, 但是以沙尘暴资料现状来说, 该检验工作仍有一定的参考价值。实际参与检验站点范围如图 2 所示, 共 723 站。

实际计算中, 选取 2012~2014 年共 25 次沙尘过程 (2012 年 10 次, 2013 年 8 次, 2014 年 7 次), 实际参与计算沙尘发生天数共 48 d, 采取 3 年总样本计算 TS 评分。

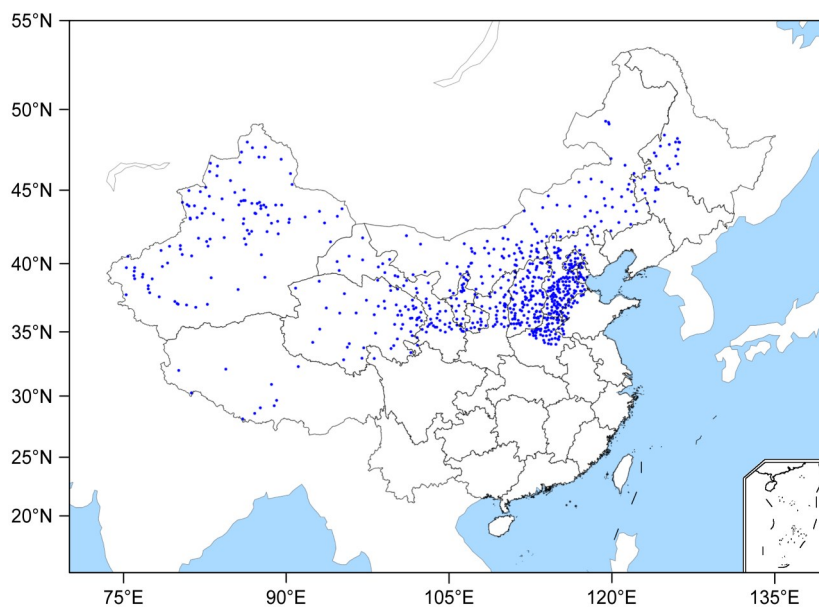


图2 沙尘检验站点分布图  
Fig. 2 The distribution of the stations which refer to the verification.

由于CUACE模式空间分辨率为0.5°（2012~2013年为1°），插值半径从0.5°（经度/纬度）开始，以0.5°为步长，至5°结束，基本覆盖可选择的插值半径范围，插值半径与TS评分统计关系如图3。可以看出，如实况采用沙尘等级，模式插值半径与TS评分在浮尘或扬沙等级成近似线性下降关系，在沙尘暴以上等级TS评分与插值半径关系几乎不大。基于此，沙尘等级最优插值半径可选为最小插值半径（图3a中竖紫色线所示），即0.5°；如采用PM10资料，TS评分在浮尘或扬沙等级根据半

径不同变化较为剧烈，沙尘暴以上等级TS评分与插值半径关系不大，可以采用浮尘或扬沙平均线（黑色虚线），即3.5°为平均最优插值半径（图3b中紫色竖线所示）。如果沙尘过程较弱，插值半径可适当减小，以1°最合适。

根据以上结果，对CUACE模式预报浓度产品、实况沙尘等级观测和PM10观测资料插值均采用各自平均最优半径，其2012~2014年大样本TS评分与资料关系比较清晰，将其对比可以发现，沙尘等级观测TS评分可用性要优于PM10资料，但

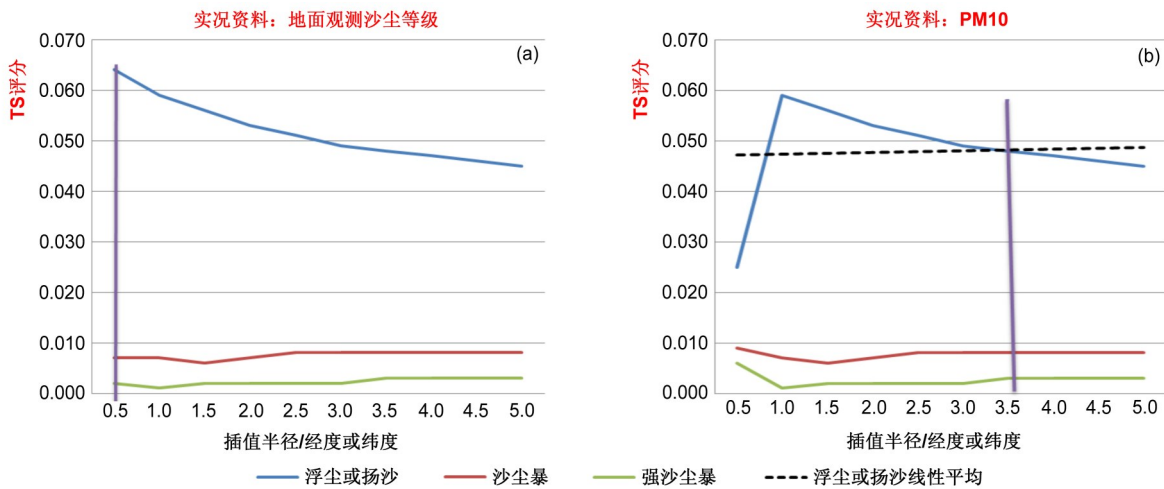


图3 CUACE模式在不同沙尘等级圆插值半径与对应TS评分散点折线图：(a)采用地面观测沙尘等级作为实况；(b)采用PM10资料作为实况。紫色竖线均代表最终选取的最优圆插值半径

Fig. 3 Graph of the scatter lines between the radii of the circular interpolation used by the CUACE numerical model and the TSs in the different sand-dust ranks: (a) Observed ground sand-dust rank; (b) PM10 observation. The erected purple lines in the both graphs show the chosen optimal radius of the circular interpolation

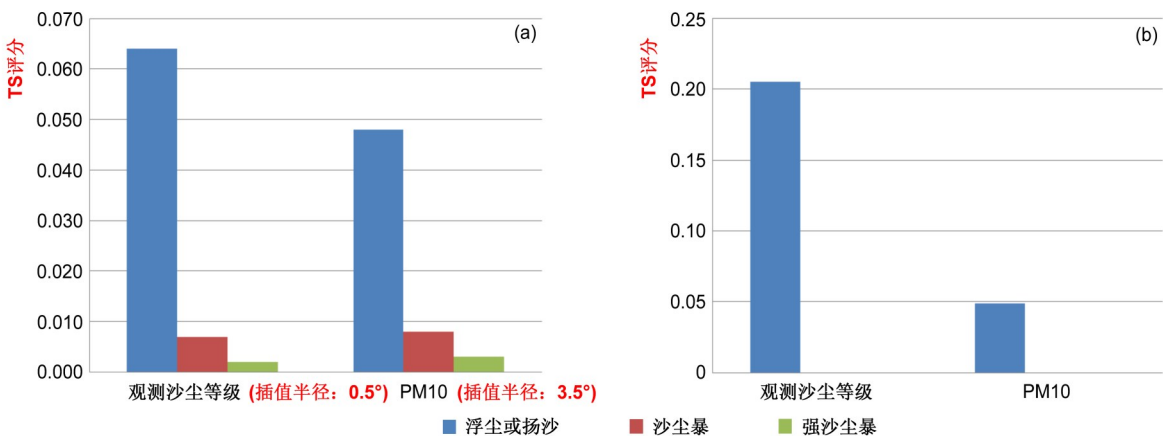


图4 (a) CUACE模式采用观测沙尘等级和PM10资料在浮尘或扬沙、沙尘暴和强沙尘暴3个等级TS评分对比；(b)预报员沙尘预报产品采用观测沙尘等级和PM10资料在浮尘或扬沙等级TS评分对比

Fig. 4 (a) The comparison among the TS scores calculated by using CUACE numerical model forecast and observed sand-dust ranks or PM10 observation at three ranks refer to float dust, sandstorm, and severe sandstorm; (b) the comparison between the TS scores calculated by using human sand-dust forecast and observed sand-dust ranks or PM10 observation at one rank refer to float dust

两者在沙尘暴以上等级 TS 评分差别不大, 总体上 CUACE 模式最优检验实况资料可选为观测沙尘等级资料。对预报员沙尘预报产品, 采用 2012~2013 年两年样本计算 TS 评分, 沙尘观测等级 TS 评分要远高于 PM10, 预报员沙尘预报产品最优检验实况资料为观测沙尘等级资料。

## 5 小结与讨论

本文使用 2012~2014 年每年 3~5 月 CUACE 模式地面沙尘浓度格点预报产品, 预报员预报等级产品、实况地面观测沙尘等级和特征站观测 PM10 资料, 对 2012~2014 年共 25 次沙尘过程, 采取 3 年总样本计算 TS 评分, 对格点产品适合的圆插值半径和预报产品适合的检验实况资料进行研究, 结论如下: (1) 如实况采用沙尘等级, 模式最优插值半径可选为最小插值半径  $0.5^\circ$ ; 如实况采用 PM10 资料, 可以采用浮尘或扬沙平均线  $3.5^\circ$  为平均最优插值半径。如果沙尘过程较弱, 插值半径以  $1^\circ$  最合适; (2) 对 CUACE 模式预报产品, 总体上最优检验实况资料可选为沙尘观测等级资料。对预报员沙尘预报产品, 最优检验实况资料为观测沙尘等级资料。

沙尘暴检验难度较大, 尤其是客观检验中资料选取和核心检验算法的技术突破需要深入研究。本文实际分析预报产品和实况资料少于 3 种, 资料分析时间段不超过 3 年, 从统计意义上来说, 选取的插值半径统计意义代表性仍不充足, 每种预报产品对应最适合的实况种类在统计意义上的代表性也不够充分, 需要扩大预报产品、实况资料和资料分析时间段, 进行更深入的进行分析, 尝试给出长期意义上有代表性的插值半径和最合适的实况资料种类。

## 参考文献 (References)

- Brooks H, Brown B, et al. 2015. The 7th International Verification Methods workshop [OL]. Austria: WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research.
- 陈豫英, 陈楠, 张磊, 等. 2016. 概率回归方法在宁夏分级沙尘天气预报中的应用检验[J]. 干旱区地理, 39(4): 704-711. Chen Yuying, Chen Nan, Zhang Lei, et al. 2016. Application verification of the regression estimation of event probabilities in graded sand prediction [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 39(4): 704-711. doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.04.003
- 段海霞, 李耀辉, 霍文, 等. 2016. GRAPES\_SDM 沙尘模式在新疆的客观检验[J]. 中国沙漠, 36(2): 441-448. Duan Haixia, Li Yaohui, Huo Wen, et al. 2016. Objective verification of GRAPES\_SDM model in Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 36(2): 441-448. doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00024
- 姜金荣, 张小曳, 迟学斌, 等. 2010. 沙尘暴数值预报模式 CUACE-Dust 的并行与优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 38(S1): 47-50. Jiang Jinrong, Zhang Xiaoye, Chi Xuebin, et al. 2010. Parallel and optimization works for sand-dust numerical forecasting model[J]. J. Huazhong Univ. Sci. Technol. Nat. Sci. Ed. (in Chinese), 38(S1): 47-50. doi:10.13245/j.hust.2010.s1.001
- 刘克利, 陈廷芝, 冯震, 等. 2008. PM10 在沙尘天气观测分级中的应用[J]. 内蒙古气象, 5: 8-9. Liu Keli, Chen Tingzhi, Feng Zhen, et al. 2008. The application of PM10 in the observe classification of the sand weather[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 5:8-9. doi: 10.3969/j.issn.1005-8656.2008.05.002
- 刘辉, 谭艳梅, 蔡仁, 等. 2008. 《亚洲沙尘暴数值模式系统》在新疆的应用及检验评估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2(5): 24-27. Liu Hui, Tan Yanmei, Cai Ren, et al. 2008. The evaluation of application and verification of CUCSDust in Xinjiang[J]. Desert Oasis Meteorol. (in Chinese), 2(5): 24-27. doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2008.05.005
- Meng Q T, Zong Z P, Zhang H D. 2012. The 2011 annual verification report of the operational sandstorm numerical models of the National Meteorological Center[C]. 2012 IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI), 710-720.
- 邱雪, 张明军, 王圣杰. 2015. 西北干旱区 PM10 浓度特征及其与水平能见度的关系[J]. 生态环境学报, 24(3): 436-443. Qiu Xue, Zhang Mingjun, Wang Shengjie. 2015. The PM<sub>10</sub> concentration characteristics and its relationship with horizontal visibility in arid Northwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 24(3): 436-443. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.03.010
- 孙钦宏, 王宁, 慕秀香. 2012. 亚洲沙尘暴数值预报模式(CUACE-Dust)对吉林省主要城市预报能力检验分析[J]. 吉林气象, 19(2): 2-4, 41. Sun Qinhong, Wang Ning, Mu Xiuxiang. 2012. The analysis verification of the prediction to the main cities in Jilin Province of the Asia sandstorm numerical model (CUACE/Dust) [J]. Jilin Meteorology (in Chinese), 19(2): 2-4, 41.
- Terradellas E, Sara B, José M. 2013. Model Inter-Comparison and Evaluation of Dust Forecasts [OL]. Barcelona: Regional Center for Northern Africa, Middle East and Europe of the WMO SDS-WAS.
- Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, et al. 2008. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/Dust[J]. Atmos. Chem. Phys., 8(4): 787-798. doi:10.5194/acp-8-787-2008
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. Atmos. Chem. Phys., 12(2): 779-799. doi:10.5194/acp-12-779-2012
- 中国气象局. 2006. 沙尘暴国家标准——沙尘暴天气等级(GB/T20480-2006)[S]. 北京: 气象出版社, 1-4. China Meteorological Administration. 2006. Sandstorm National Standard—The Weather Classification of Sandstorm (GB/T20480-2006)[S]. Beijing: China Meteorological Press, 1-4.