

季节偏差纠正下的遥感 AOD 产品降尺度 BGIM 算法

梁玉, 邹滨, 冯微微, 刘宁

中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

摘要: MODIS 3 km DT (Dark Target) 卫星气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth) 数据产品已广泛应用于大气污染监测, 但受反演方法限制, 该数据产品像元缺失严重、时空覆盖度低、精度偏低。相比, MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据产品因融合 DT 和 DB (Deep Blue) 两种反演算法, 一定程度上可弥补 MODIS 3 km DT AOD 数据产品在时空覆盖度与精度方面的缺陷, 但分辨率偏低。此外, 受气溶胶组分来源的季节变化与地表反射率估算的季节性误差影响, MODIS AOD 数据产品精度同时也存在季节性特征。本文由此以京津冀为试验区, 顾及 AOD 季节变化特性, 开展 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据产品偏差纠正下的地统计反演模拟 BGIM (Bias-corrected Geostatistical Inverse Model) 降尺度算法研究。试验同时引入 AERONET 地基观测数据和 MODIS 3 km DT AOD 数据产品作为降尺度结果的绝对与相对验证标准。结果表明: 季节偏差系数纠正下生成的 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 与 10 km DT_DB_Combined AOD、3 km DT AOD 数据产品的绝对精度相当, 验证 R^2 分别为 0.79、0.70、0.71; 且相比 MODIS 3 km DT AOD 数据产品, 季节偏差系数纠正下的 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 数据与其相关系数可达 0.93; 在时间覆盖度和空间覆盖度方面可分别提升 11.21% 和 11.44%, 其中春、冬两季空间覆盖度提升效果尤为显著。研究结果证实 BGIM 降尺度算法可有效估算 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 数据, 提高 MODIS 3 km AOD 产品的时空覆盖度, 并同时抑制原有 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据产品的季节性高估现象。

关键词: 遥感, AOD, 降尺度, BGIM, 时空统计, 京津冀

引用格式: 梁玉, 邹滨, 冯微微, 刘宁. 2022. 季节偏差纠正下的遥感 AOD 产品降尺度 BGIM 算法. 遥感学报, 26(8): 1602-1613

Liang Y, Zou B, Feng H H and Liu N. 2022. Seasonal deviation correction enhanced BGIM downscaling algorithm for remote sensing AOD products. National Remote Sensing Bulletin, 26 (8) : 1602-1613 [DOI: 10.11834/jrs.20219351]

1 引言

气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth) 为气溶胶消光系数在垂直方向上的积分, 是表征大气浑浊度的重要物理参数。AOD 数据广泛应用于气溶胶辐射强迫 (衣娜娜等, 2017)、遥感大气校正 (孙林等, 2016)、地表大气污染估算 (Xie 等, 2015) 等方面。相对地基观测, 卫星遥感手段理论上可以弥补地基站点稀疏这一缺陷, 实现大尺度空间连续观测 (Zou 等, 2017; 牛峰等, 2006)。近年来, 美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 发布了基于 DT (Dark Target)、DB (Deep Blue)、

DT_DB_Combined (Dark_Target_Deep_Blue_Combined) 和 MAIAC (Multiangle Implementation of Atmospheric Correction) 算法的 MODIS AOD 数据产品 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/> [2019-10-26])。其中基于 MAIAC 算法反演的 AOD 数据空间分辨率最高 (Lyapustin 等, 2018), 且在中国地区验证精度最高 (Liu 等, 2019)。DT 算法更适宜农田、森林和建成区的气溶胶反演; 然而在干旱、半干旱、沙漠、城市工业区等植被覆盖度较低的亮地表 (尤其是冬季) 地区 (Hsu 等, 2004; Munchak 等, 2013), DT 算法反演获取的 AOD 效果较差, 像元缺失较多 (杨以坤等, 2016)。相比之下, DB 算法可有效提升 AOD 产品在亮地表地区

收稿日期: 2019-10-26; 预印本: 2020-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41871317); 国家重点研发计划大气重点专项(编号:2016YFC0206205); 中南大学创新驱动计划(编号:2018CX016)

第一作者简介: 梁玉, 研究方向为大气气溶胶应用。E-mail: LiaYu798@163.com

通信作者简介: 邹滨, 研究方向为大气污染遥感制图、环境地理信息系统建模与服务。E-mail: 210010@csu.edu.cn

的覆盖度 (Kaufman 等, 1997; Wei 等, 2019); 而融合了 DT 和 DB 算法的 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据更可用来弥补 MODIS 3 km DT (Dark Target) AOD 产品在时空覆盖度、精度上的不足 (Levy 等, 2013; 王海林 等, 2019)。空间降尺度方法是解决这一问题的有效方案之一, 它可以将大尺度、低分辨率的信息转化为小尺度、高分辨率的信息 (Huth, 2002; Duan 等, 2019; Stathopoulou 和 Cartalis, 2009)。Zhao 等 (2019) 采用随机森林方法实现了将 MODIS 10 km AOD 数据降尺度到 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 分辨率, 但其结果与 AERONET 地基 AOD 的验证 R^2 仅为 0.36; Wang 等 (2013) 运用地统计学反演模拟 GIM (Geostatistical Inverse Model) 将空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 Terra-MISR AOD 与空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 Terra-MODIS AOD 融合并降尺度得到空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的全球 AOD 分布, 且十折交叉验证结果精度良好。

然而, 研究发现 DT 算法虽在地表适宜地区反演得到的 DT AOD 数据与 AERONET 地基观测值在整体上有很好的 consistency (Li 等, 2009), 但由于气溶胶组分来源受季节影响 (张婕 等, 2016), 地表反射率的估算也存在季节性误差, 使得 MODIS AOD 数据产品精度存在季节性差异 (张婕, 2018)。已有验证结果表明 DT AOD 数据、DT_DB_Combined AOD 数据存在随季节变化的高估现象 (王晓元 等, 2012; De Leeuw 等, 2018)。

对此, 本文拟耦合地统计反演模拟与季节偏差系数开展 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 产品空间降尺度研究, 同时改善其高估现象。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

京津冀地区地处华北平原北部, 三面环山, 海拔呈西北高东南低的分布特征, 空气污染不易扩散。该地区作为“首都经济圈”, 土地利用类型以建设用地、林地和草地为主。属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候, 春季干旱多风, 夏季炎热多雨, 秋季凉爽少雨, 冬季寒冷少雪。总体来说气候条件较好, 雨热同期。京津冀地区空气质量监测国控站点数据显示: 2013年各站点 $PM_{2.5}$

年均浓度为 $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2017年 $PM_{2.5}$ 平均浓度相比 2013年虽下降了 39.6%, 但仍是空气污染较为严重的区域, 且人为排放对京津冀地区 AOD 的贡献最大。

2.2 数据源及预处理

MODIS AOD 数据采用 TERRA-MODIS C006 Level 2 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/> [2019-10-26]) 融合 DT 和 DB 的 10 km DT_DB_Combined AOD 产品作降尺度研究的输入数据。同时, 3 km DT AOD 产品用于 3 km DT_DB_Combined AOD 数据的相对验证, 数据时间跨度为 2013-01-01—2017-12-31。MODIS AOD 产品采用层级数据格式 HDF (Hierarchical Data Format) 文件结构存储, 应用 IDL 语言对 HDF 数据进行投影、拼接以及重采样等操作。为确保数据有效性, 在此过程中采用 ArcGIS 栅格空间分析工具筛选栅格质量控制标志 QA=3 的 AOD 数据作为有效 AOD 值。

地基 AOD 数据采用 AERONET 气溶胶光学厚度观测资料, 其观测误差位于 0.01—0.02 (Che 等, 2019), 可视为真值对卫星遥感 AOD 产品以及本文降尺度结果进行绝对验证 (Ichoku 等, 2002)。本文选取位于京津冀地区的 Beijing、Beijing-CAMS、XiangHe 这 3 个地基站点 AERONET Level 2.0 产品, 同时统计 Terra 卫星过境前后 30 min AERONET 地基 AOD 数据均值的有效数量 N , 如图 1 所示, 其中 N 为站点与卫星观测 AOD 值匹配的数量, 括号中数值为站点经纬度坐标。为便于与卫星遥感 AOD 产品进行直接比较, 将 500 nm 和 675 nm 通道处的 AERONET 地基 AOD 基于 Angstrom 指数插值得到 550 nm 通道处的 AOD 数据 (Chu 等, 2002)。在与 Terra MODIS AOD 进行时空窗口匹配的过程中, 选取 Terra 卫星过境前后 30 min 的 AOD 数据均值与 AERONET 站点周围 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ 范围内 (范围内卫星观测值数量 > 5) 的 AOD 像元值均值进行匹配 (李忠宾 等, 2020)。

2.3 BGIM 降尺度算法模型构建

2.3.1 遥感 AOD 产品偏差纠正模型简化

地基 AOD 数据常作为真值用于纠正遥感 AOD 产品不可避免存在的偏差 (Schaap 等, 2008)。但因地基 AOD 站点稀疏, 一般无法对全局大尺度区域进行直接的偏差纠正, 往往需要建立起顾及卫

星观测几何、地表覆盖、地形、季节等因素的通用偏差纠正模型 (Malakar 等, 2012)。但在局地尺度下的京津冀, 此类偏差在空间上相对受卫星观测几何、地表覆盖等因素的均质影响而言, 季节尺度上的异质性影响更加显著, 因此可构建如下偏差纠正模型:

$$f(i, j, t) = \varepsilon_t \quad (1)$$

式中, f 为偏差纠正模型, (i, j) 为遥感 AOD 产品像

元位置, t 为季节, ε_t 代表不同季节的偏差系数。 ε_t 的具体计算如下:

$$\varepsilon_t = \text{avg}(|z - \text{AOD}_{\text{aero}}|) \quad (2)$$

式中, z 代表不同季节下 $n \times 1$ 阶粗糙分辨率的 AOD 测量值, 即本文的 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据, AOD_{aero} 代表不同季节下 AERONET 地基 AOD 数据。 $|*|$ 与 avg 分别代表绝对值与平均值算子。

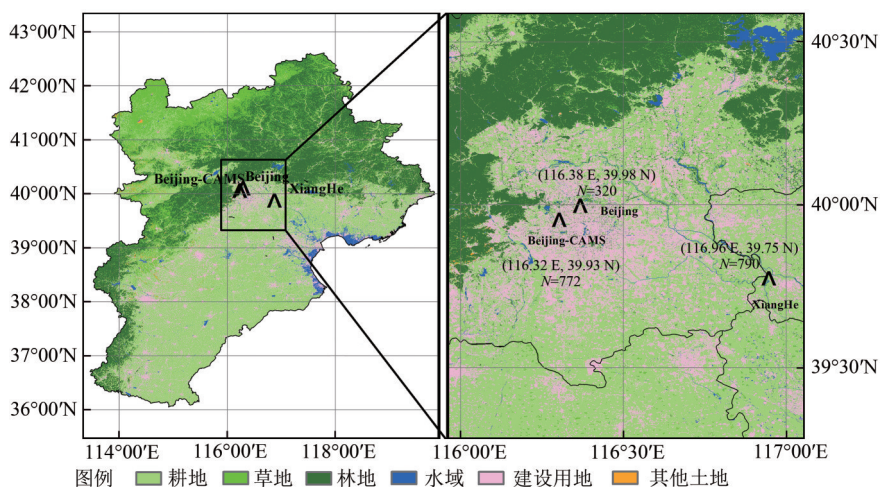


图 1 京津冀地区地基 AERONET 站点分布图

Fig.1 Ground AERONET sites distribution map in Beijing-Tianjin-Hebei region. N is the number of AOD values matched by ground AERONET sites and satellite observations, and the brackets are the latitude and longitude coordinates of the sites

2.3.2 BGIM 降尺度模型构建

基于地统计学的降尺度方法是以空间协方差函数为工具、插值预测为手段 (梁永忠 等, 2015), 但却不同于传统的插值方法。GIM 降尺度方法在进行插值的同时考虑了细微尺度与粗糙尺度下变量的空间协方差函数差异 (Kitanidis, 1995), 这也与现有研究得出的不同分辨率 AOD 数据趋势一致但空间细节存在差异是相符合 (Guang 等, 2008)。理论上, 不同分辨率数据的协方差模型参数并不相同, GIM 降尺度建模常可通过约束性极大似然法 (Restricted Maximum Likelihood-Inverse Modeling, REML-Inverse Modeling) 估算细微分辨率下的协方差模型参数 (Kitanidis, 1995)。因此, 作为纯数据驱动模型, GIM 建模过程中的细微分辨率结果及其不确定性往往可以直接通过原始分辨率数据估算求解。据此, 偏差纠正下的 GIM (Bias-corrected GIM) 模型可用以下公式表示:

$$z - \varepsilon_t = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (3)$$

式中, \mathbf{s} 代表 $m \times 1$ 阶细微预测值, 即季节偏差系数

纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD; \mathbf{v} 代表均值为 0 的模型数据匹配误差; \mathbf{H} 是高分辨率数据与低分辨率数据的 $n \times m$ 阶映射矩阵。本文根据 Wang 等 (2013) 的工作, 假设粗糙测量值 z 下的细微预测值 \mathbf{s} 对粗糙测量值 z 具有相同贡献, 即 \mathbf{H} 服从于均匀分布。

为估算式 (3) 中细微预测值 \mathbf{s} 的最佳预测值 $\hat{\mathbf{s}}$, 需要对下述方程求解:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^T + \mathbf{R} & \mathbf{H}\mathbf{X} \\ (\mathbf{H}\mathbf{X})^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}^T \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}\mathbf{Q} \\ \mathbf{X}^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $(*)^T$ 为转置算子, \mathbf{R} 为匹配误差 \mathbf{v} 的协方差矩阵, $\boldsymbol{\lambda}$ 是观测值的 $m \times n$ 阶权重, \mathbf{M} 是一个 $p \times m$ 阶拉格朗日乘数 (Kitanidis, 1995)。 \mathbf{X} 为 $m \times p$ 阶模型趋势矩阵, 通常可以由 p 个相关变量回归表达。不同的是, 本文首先采用一个滑动窗口 (如 8×8) 去掉趋势得到一个更加平稳的残余后, 再利用 BGIM 建模, 因此本文中 \mathbf{X} 为一个全为 1 列向量。 \mathbf{Q} 为细微分辨率的空间协方差矩阵, 采用指数协方差模型表达 (Michalak 等, 2004), 其参数求取借助极

大化目标似然函数方程 L ：

$$L = \frac{1}{2} \ln |\boldsymbol{\psi}| + \frac{1}{2} \left| \mathbf{X}^T \mathbf{H}^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \right| + \frac{1}{2} \mathbf{z}^T \mathbf{E} \mathbf{z} \quad (5)$$

为提高公式的可读性，新增中间变量 \mathbf{E} 与 $\boldsymbol{\psi}$ 。

式 (5) 中， $\mathbf{E} = \boldsymbol{\psi}^{-1} - \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{X} (\mathbf{X}^T \mathbf{H}^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{H}^T \boldsymbol{\psi}^{-1}$ ， $\boldsymbol{\psi} = \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}$ 。对于极大化式 (5)，本文首先用粗糙的 AOD 分辨率数据估算空间协方差模型参数初值，然后采用多元非线性优化函数求解 (Byrd 等, 1999)。

求解式 (4)、(5)，得到 $\boldsymbol{\lambda}$ 与 \mathbf{M} 后，便可计算细微预测值 $\hat{\mathbf{s}}$ 及其不确定性大小 $\mathbf{V}_{\hat{\mathbf{s}}}$ ，如式 (6) 与式 (7) 所示：

$$\hat{\mathbf{s}} = \boldsymbol{\lambda} (\mathbf{z} - (\mathbf{v} - \boldsymbol{\varepsilon}_i)) \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_{\hat{\mathbf{s}}} = -\mathbf{X} \mathbf{M} + \mathbf{Q} - \mathbf{Q} \mathbf{H}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (7)$$

式中， $\mathbf{V}_{\hat{\mathbf{s}}}$ 矩阵的对角元素表示 $\hat{\mathbf{s}}$ 中各元素的预测不确定性方差。

2.4 模型验证

本研究从绝对验证与相对验证两个方面，并引入空间覆盖度与时间覆盖度两个指标对 BGIM 算法开展验证。绝对验证指 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据、MODIS 3 km DT AOD 数据、MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 及偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_季节 Combined AOD，分别与 AERONET 地基 AOD 数据开展精度验证。选用决定系数 (R^2)、相关系数 (R)、偏差 (Bias) 和均方根误差 (RMSE) 等统计指标评价模型验证精度，各指标计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (AOD_{\text{sat}} - AOD_{\text{aero}})^2}{\sum_{i=1}^N (AOD_{\text{aero}} - \overline{AOD}_{\text{aero}})^2} \quad (8)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (AOD_{\text{sat}} - \overline{AOD}_{\text{sat}})(AOD_{\text{aero}} - \overline{AOD}_{\text{aero}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (AOD_{\text{sat}} - \overline{AOD}_{\text{sat}})^2 \sum_{i=1}^N (AOD_{\text{aero}} - \overline{AOD}_{\text{aero}})^2}} \quad (9)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (AOD_{\text{aero}} - AOD_{\text{sat}})^2}{N}} \quad (10)$$

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (AOD_{\text{sat}} - AOD_{\text{aero}}) \quad (11)$$

式中， AOD_{aero} 与 AOD_{sat} 分别为 AERONET 地基 AOD、遥感 MODIS AOD 产品或 MODIS AOD 降尺

度数据。 $\overline{AOD}_{\text{aero}}$ 与 $\overline{AOD}_{\text{sat}}$ 分别为 AERONET 地基 AOD 的平均值、遥感 MODIS AOD 产品或 MODIS AOD 的平均值。

相对验证是指将 MODIS 3 km DT AOD 数据与季节偏差系数纠正下的 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 分别做季均统计，取二者均有效的 AOD 像元值进行拟合，验证季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 与 MODIS 3 km DT AOD 在不同季节的相关程度。同样采用 R 、Bias、RMSE 等统计指标进行精度评价。

空间覆盖度 S 为研究区内逐日有效像元数量 g 与研究区内总像元数 G 的百分比，如式 (12) 所示。时间覆盖度 T 是指研究区内各像元在 2013—2017 年含有效值的天数 P 占总天数 D ($D=1826$) 的百分比，如式 (13) 所示。

$$S(k) = \frac{g(k)}{G} \times 100\% \quad (12)$$

$$T(i,j) = \frac{P(i,j)}{D} \times 100\% \quad (13)$$

式中， (i,j) 为 AOD 像元位置， k 为天数。

3 结果与分析

3.1 偏差系数的季节特征

通过对成功匹配的 1346 对 AERONET 地基 AOD 与 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 作差，发现差值服从均值为 0.145、方差为 0.039 的正态分布，且存在着显著的季节变化特征。表 1 表明，相对于春、秋、冬共 3 季偏差匹配结果，夏季成功匹配的数量最少，偏差均值最大，达 0.26。

表 1 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 与 AERONET 地基 AOD 间的偏差

Table 1 Deviation between MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD and AERONET

季节	均值	方差	匹配数量
春	0.13	0.03	457
夏	0.26	0.05	222
秋	0.13	0.02	284
冬	0.11	0.04	383

3.2 模型绝对精度验证结果分析

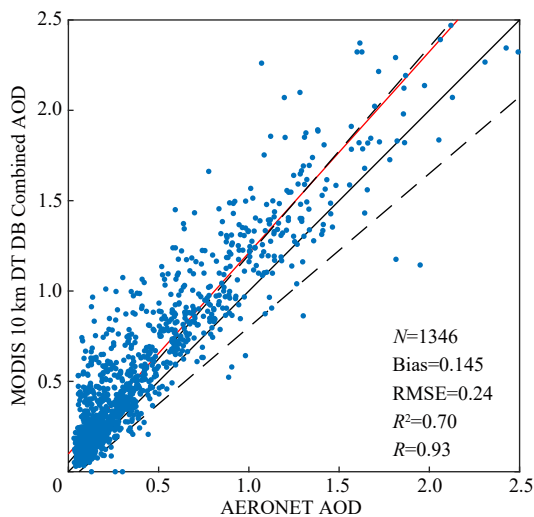
绝对验证结果见图 2。由图 2 (c) 可知，京津冀地区 2013 年 1 月—2017 年 12 月期间共成功匹配 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 与 AERONET

地基 AOD 点对 1463 个；点对 AOD 值的 RMSE 为 0.26, Bias 为 0.155, R^2 为 0.67, R 为 0.92, 说明 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 降尺度估算结果精度可靠。将图 2 (c) 与图 2 (a) 和 2 (b) 进一步对比可知, MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 精度虽略低于 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 精度 0.70 和 MODIS 3 km DT AOD 精度 0.71, 但与 AERONET 地基 AOD 匹配点对数量提升至 1463 对。对比图 2 (c) 与图 2 (b), 相比于 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD, 空间分辨率由 10 km 提升至 3 km; 相比于 MODIS 3 km DT AOD, Bias 从 0.188 下降至 0.155, 下降了 0.033。然而通过图 2 (a) — 图 2 (c) 可以看出, 与 AERONET 地基 AOD 相比, MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据、MODIS 3 km DT AOD 数据及通过 GIM 降尺度得到的 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 仍然存在高估现象, 这是由于城市地区适用于 DT 算法反演所需的浓密植被较少, 高地表异质性增加了地表反照率估算的不确定性 (Wang 等, 2017)。此外, 京津冀作为全国空气污染最为严重的区域之一, 气溶胶模式以灰霾气溶胶为主 (Li 等, 2013), 而 MODIS 不同反演算法均假定该地区气溶胶类型为混合型气溶胶, 影响了地表反射率的设定, 这也是 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 及 MODIS 3 km DT AOD 产生高估现象的原因之一 (张婕, 2018)。而通过图 2 (d) 季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km

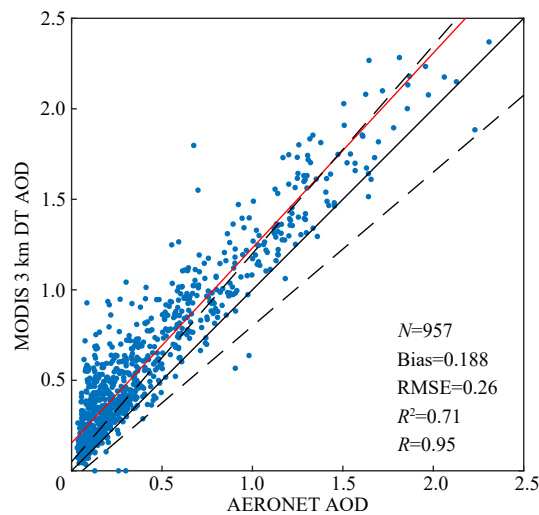
DT_DB_Combined AOD 与 AERONET 地基 AOD 的验证结果可以看出, BGIM 算法可有效改善高估现象, Bias、RMSE 分别下降至 0.009、0.21, R^2 提升至 0.79。十折交叉验证采用的数据为 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据与 AERONET 地基 AOD 的匹配值, 同时将各季节的匹配值进行了 10 次高斯拟合 (将样本随机分为 10 等份, 每次随机选取其中的 9 份), 进一步消除因 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 精度过低带来的误差, 因此十折交叉验证匹配的数量点少于图 2 (d) 但精度略高于图 2 (d) 的结果, 如图 3 所示。同时, 十折交叉验证结果中 0.004 的 Bias 值也进一步证实了本文构建的季节性偏差增强下的 BGIM 算法在京津冀地区 MODIS AOD 降尺度中的适用性。

3.3 模型相对精度验证结果分析

从相对验证结果见图 4 可以看出, 季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 与 MODIS 3 km DT AOD 的拟合情况存在明显的季节差异。春、夏、秋季拟合效果较好, 相关系数 R 均在 0.97 以上。其中夏季 Bias 均高于 0.26、RMSE 均高于 0.28, 一方面是因为京津冀地区夏季 AOD 较高, 从统计学的角度讲, Bias 和 RMSE 也会相对较高; 另一方面是因为在夏季温度湿度双高条件下易生成硝酸盐气溶胶, 使得该地区实际的气溶胶类型与 MODIS 反演算法在该地假定的混合型气溶胶不一致, 从而产生较大偏差。冬季因积雪覆盖导致匹配数量较少, 但相关系数仍高于 0.93。



(a) MODIS 10 km DT DB Combined AOD
(a) MODIS 10 km DT DB Combined AOD



(b) MODIS 3 km DT AOD
(b) MODIS 3 km DT AOD

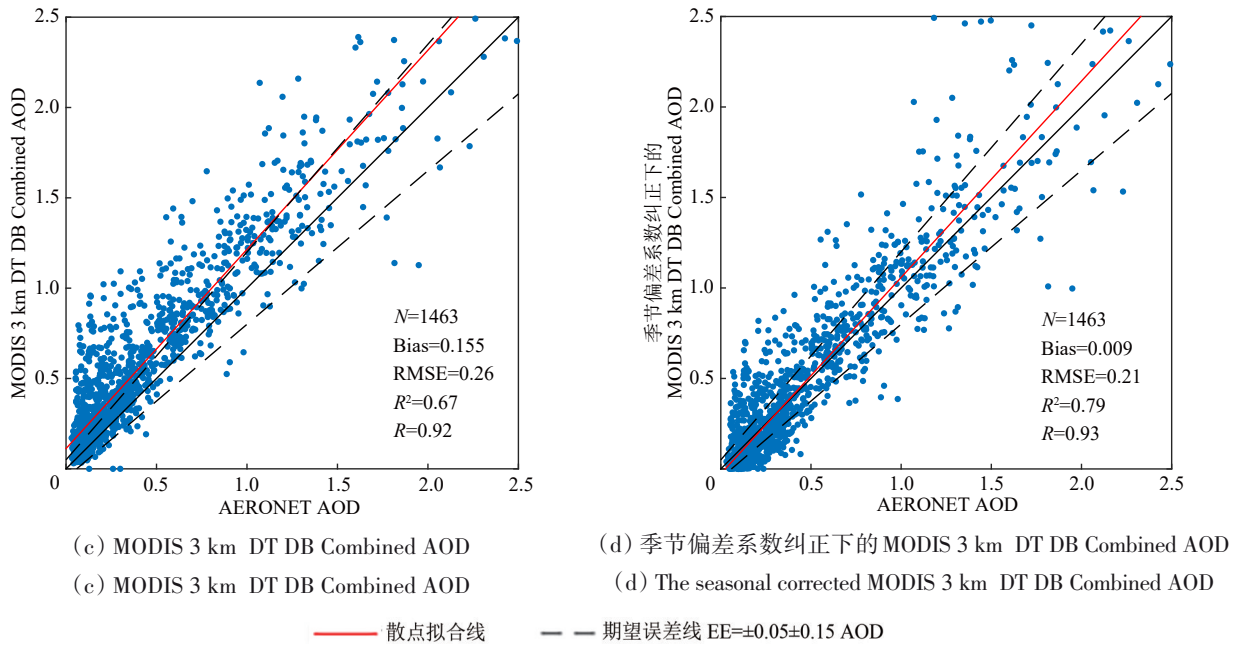


图2 绝对验证结果

Fig. 2 Absolute validation results

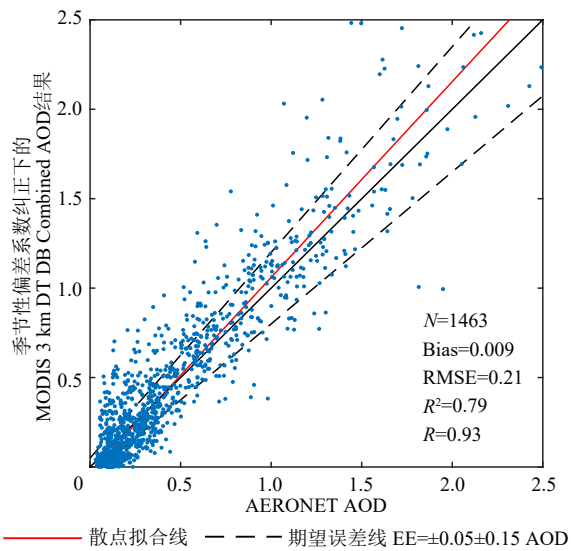


图3 十折交叉验证结果

Fig.3 Ten fold cross validation results

季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined 季均 AOD 结果见图 5。由于京津冀地区地势西北高、东南低，使得南部地区污染不易扩散，造成京津冀地区 AOD 值南高北低的现象。且京津冀地区 AOD 分布存在明显季节性的变化，夏季显著高于其他季节，高值主要位于北京、天津南部和河北南部。这是由于该地区人口稠密、生产工业活动较多，且夏季高温提高了二次有机气溶胶的转化(郑攻等, 2014)；春季 AOD 均值仅次于夏季是因为春季京津冀地区易受沙尘污染(刘浩等, 2015)；

秋季 AOD 均值下降是因为降雨增加，大气气溶胶得到湿沉(景悦等, 2018)；冬季因为冬季京津冀地区常受到西北冷气流影响，清洁干空气较多，所以 AOD 值较低(晏利斌等, 2009)。从时间趋势上来看，京津冀地区 AOD 总量呈现逐年下降的趋势。

3.4 时空覆盖度提升效果

图 6 (a) 表示 2013 年 1 月—2017 年 12 月京津冀地区逐日 MODIS 3 km DT AOD 和季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 空间覆盖度统计结果图；图 6 (b) 为后者相比于前者的空间覆盖度提升效果。对比图 6 (a) 中两种 AOD 数据的空间覆盖度分布可知，通过季节偏差系数纠正下的 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 空间覆盖度相较于 NASA 发布的 MODIS 3 km DT AOD 产品有明显提升，在 2013 年—2017 年间平均提升了 11.44%，单日提升最大值可高达 60.00%。且受地表积雪覆盖及植被落叶的影响，冬季 MODIS 3 km DT AOD 平均空间覆盖度最低，仅为 9.81%，而与之对应的季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 空间覆盖度平均提升幅度最大，提升幅度达 22.61%。

图 7 (a) 和图 7 (b) 分别展示了 MODIS 3 km DT AOD 与季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 时间覆盖度的空间分布图。

从图 7 (b) 可知, 研究区内 2013 年—2017 年 MODIS 3 km DT AOD 产品像元时间覆盖度平均值为 22.56%; 而图 7 (a) 中季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 的像元时间覆盖度平均值为 33.77%; 由图 7 (c) 的提升效果图可知, 季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD 相比于 NASA 提供的同空间分辨率的 MODIS 3 km DT 产品在研究区域内 31006 个像元时间覆盖度均有一定提升, 平均提升了 11.21%,

尤其是京津冀中东部地区即北京、天津、唐山地区, 时间覆盖度提升超过 15.00%。究其原因, 该区域人口稠密, 城市化程度较高 (梁龙武等, 2019), 植被覆盖率较低, 不适宜采用 DT 算法反演, 而 DB 算法弥补了 DT 算法在亮目标处反演的不足。图 7 (a) 结果正是基于融合了 DT 和 DB 算法的 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据, 采用 BGIM 方法, 顾及空间自相关性的结果。因此二者作差, 在图 7 (c) 中呈现明亮的黄色。

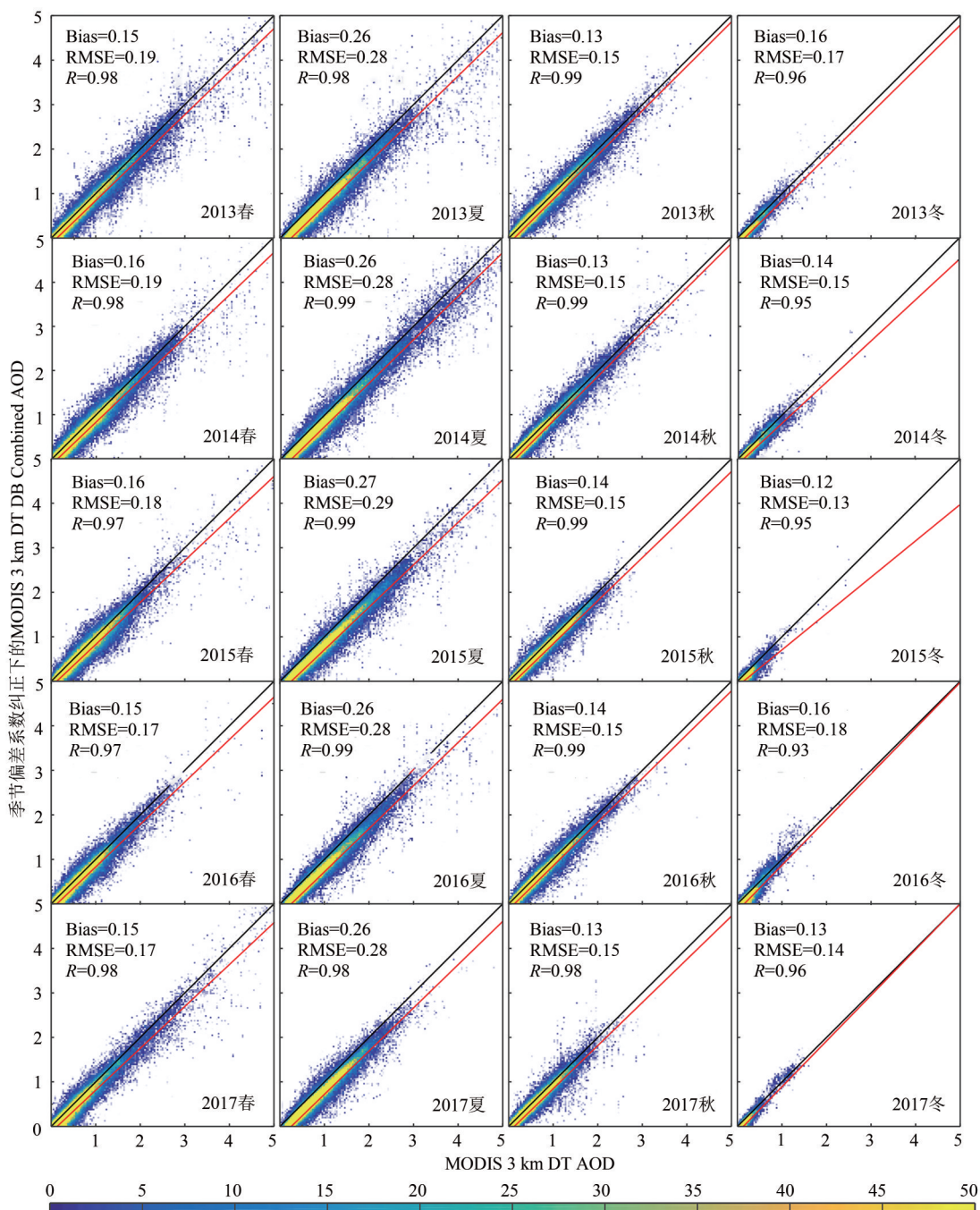


图 4 相对验证结果

Fig.4 Relative validation results

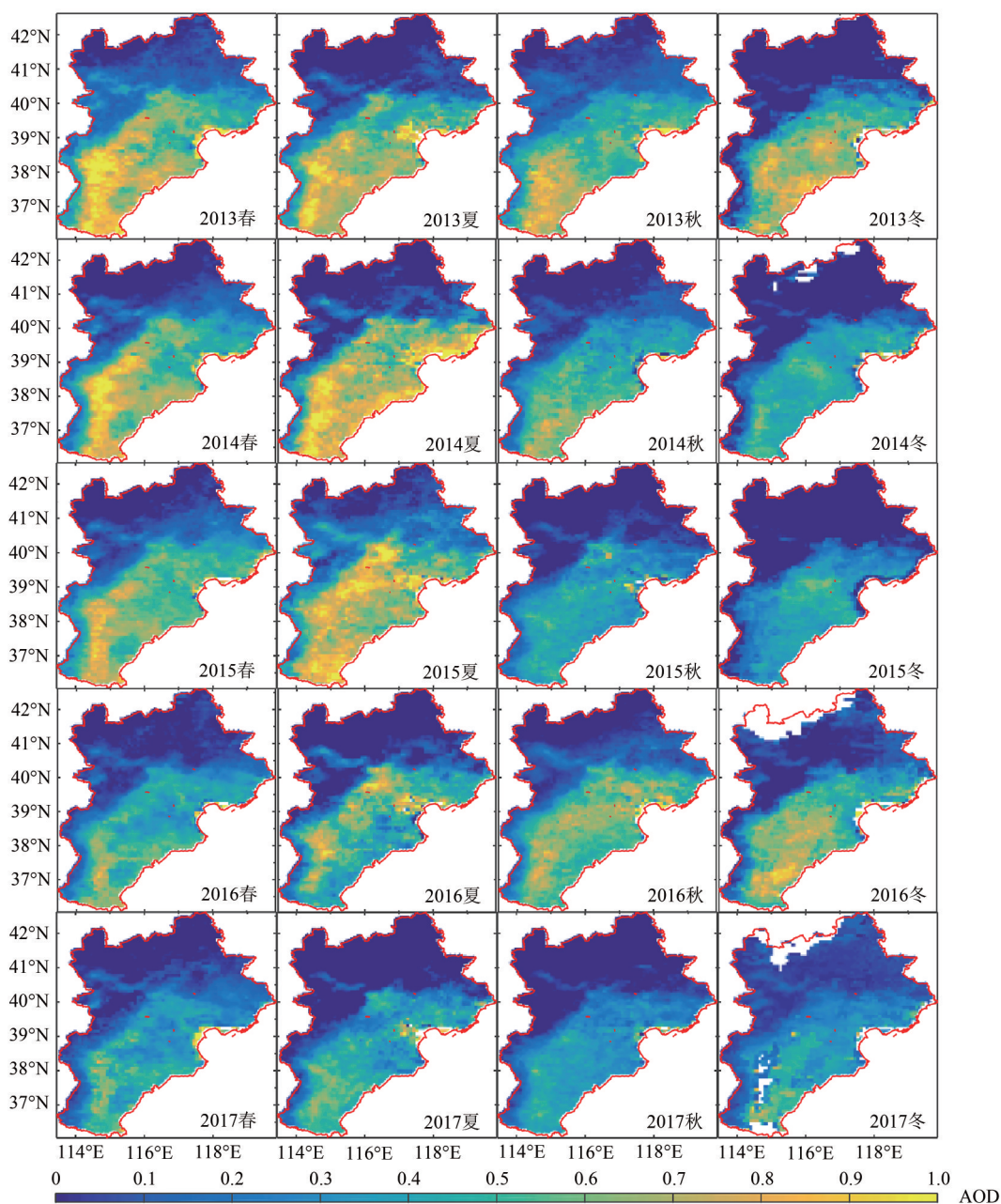
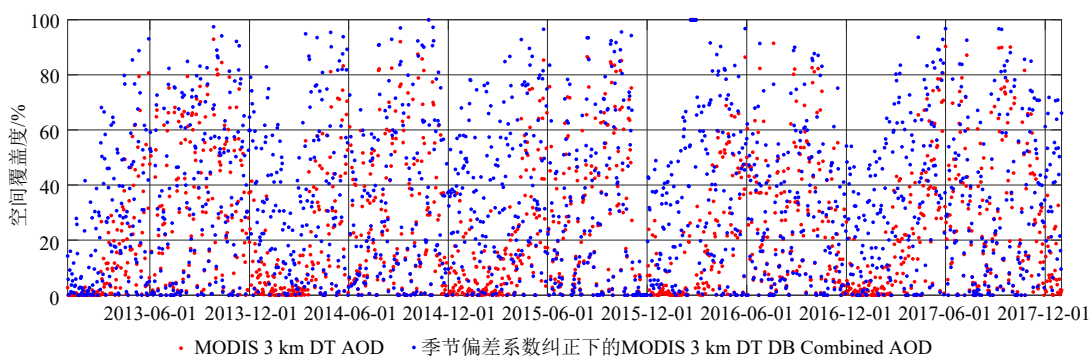
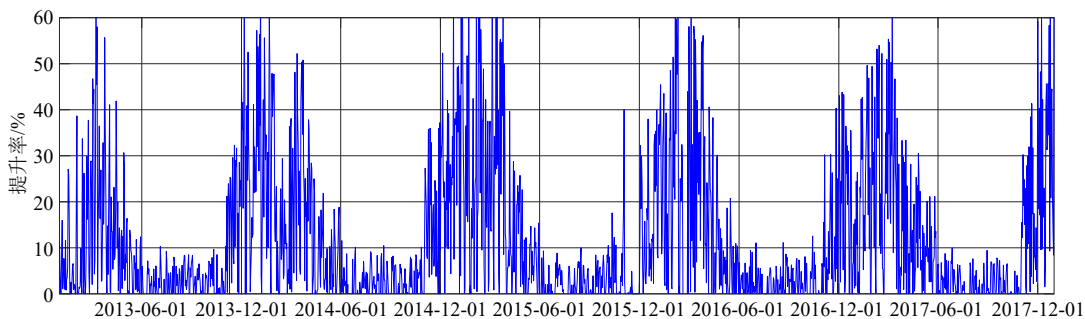


图5 季节偏差系数纠正下MODIS 3 km DT_DB_Combined 季均AOD
 Fig.5 Results of the seasonal corrected MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD



(a) 空间覆盖度
 (a) Spatial coverage

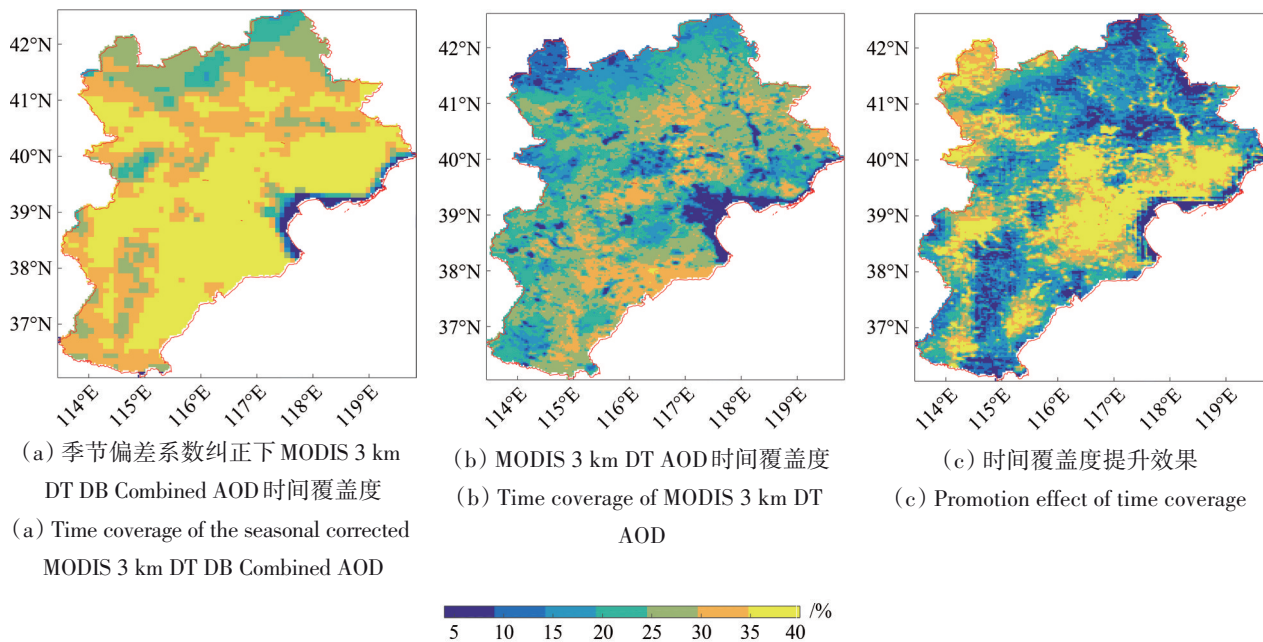


(b) 空间覆盖度提升效果

(b) Promotion effect of spatial coverage

图6 空间覆盖度及提升效果

Fig.6 Spatial coverage and promotion effect



(a) 季节偏差系数纠正下 MODIS 3 km DT DB Combined AOD 时间覆盖度
(a) Time coverage of the seasonal corrected MODIS 3 km DT DB Combined AOD

(b) MODIS 3 km DT AOD 时间覆盖度
(b) Time coverage of MODIS 3 km DT AOD

(c) 时间覆盖度提升效果
(c) Promotion effect of time coverage

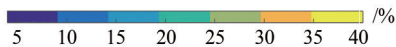


图7 时间覆盖度及提升效果

Fig.7 Time coverage and promotion effect

4 结论

针对目前 MODIS 3 km DT AOD 数据像元缺失严重，但 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据可弥补这一缺陷的问题，本研究基于 2013—2017 年京津冀地区 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据，采用 BGIM 降尺度算法得到季节偏差系数纠正下的 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD。分别利用 AERONET 地基 AOD 及 MODIS 3 km DT AOD 对其进行绝对验证及相对验证，同时比较其与 MODIS 3 km DT AOD 数据在时空覆盖度上的差异，得出以下结论：

(1) 京津冀地区 AOD 季节空间分布结果表明，

高值区分布在北京、天津和河北省东南部，低值区主要分布在河北省北部，且夏季 AOD 均值最高，春季其次，秋季最低；

(2) 卫星遥感反演的 MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD 数据与 AERONET 地基 AOD 数据间存在季节性偏差；

(3) 相比于 MODIS 3 km DT AOD 产品，本文采用 BGIM 降尺度方法，考虑季节偏差因子得到的 MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD，在反演精度和时空覆盖度方面有明显提升，其中春、冬两季时空覆盖度提升效果最为明显；

以后的工作可基于 BGIM 降尺度方法，纳入与 AOD 直接相关的气象要素（如风速、风向、降

水)、地表要素(如DEM、NDVI)以及社会经济要素(如人口、道路)等,进一步提升AOD的时空覆盖度以及空间分辨率。

志 谢 感谢NASA发布的MODIS数据;感谢AERONET发布的大气气溶胶地基观测数据。

参考文献(References)

- Byrd R H, Hribar M E and Nocedal J. 1999. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming. *SIAM Journal on Optimization*, 9(4): 877-900 [DOI: 10.1137/S1052623497325107]
- Chen H Z, Yang L K, Liu C, Xia X G, Wang Y Q, Wang H, Wang H, Lu X F and Zhang X Y. 2019. Long-term validation of MODIS C6 and C6.1 Dark Target aerosol products over China using CARS-NET and AERONET. *Chemosphere*, 236: 124268 [DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.238]
- Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, Remer L A, Tanré D and Holben B N. 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophysical Research Letters*, 29(12): MOD2-1—MOD2-4 [DOI: 10.1029/2001GL013205]
- De Leeuw G, Sogacheva L, Rodriguez E, Kourtidis K, Georgoulas A K, Alexandri G, Amiridis V, Proestakis E, Marinou E, Xue Y and Van Der Ronald A. 2018. Two decades of satellite observations of AOD over mainland China using ATSR-2, AATSR and MODIS/Terra: data set evaluation and large-scale patterns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(3): 1573-1592 [DOI: 10.5194/acp-18-1573-2018]
- Duan L M, Fan K K, Li W and Liu T X. 2019. Spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on multiple high-resolution satellite data for Inner Mongolia, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1/2): 45-59 [DOI: 10.1007/s00704-017-2347-7]
- Guang J, Xue Y, Li X W, Bai L Y, Wang Y, Li Y J, Wan W and Guo J P. 2008. Multi-spatial scale aerosol optical thickness mapping for Beijing using remote sensing technique. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B8): 485-490
- Hsu N C, Tsay S C, King M D and Herman J R. 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3): 557-569 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.824067]
- Huth R. 2002. Statistical downscaling of daily temperature in central Europe. *Journal of Climate*, 15(13): 1731-1742 [DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<1731:SDODTI>2.0.CO;2]
- Ichoku C, Chu D A, Mattoo S, Kaufman Y J, Remer L A, Tanré D, Slutsker I and Holben B N. 2002. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products. *Geophysical Research Letters*, 29(12): MOD1-1—MOD1-4 [DOI: 10.1029/2001GL013206]
- Jing Y, Sun Y L, Fu H C, Ma H, Teng Q Y and Cui Y M. 2018. Temporal and spatial variation of aerosol optical depth and analysis of influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2016. *Environmental Science & Technology*, 41(8): 104-113 (景悦, 孙艳玲, 付宏臣, 马含, 滕庆仪, 崔月明. 2018. 2010-2016年京津冀AOD时空变化及其影响因子分析. *环境科学与技术*, 41(8): 104-113) [DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.08.016]
- Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, Vermote E F, Chu A and Holben B N. 1997. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14): 17051-17067 [DOI: 10.1029/96jd03988]
- Kitanidis P K. 1995. Quasi-linear geostatistical theory for inversing. *Water Resources Research*, 31(10): 2411-2419 [DOI: 10.1029/95wr01945]
- Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, Remer L A, Sayer A M, Patadia F and Hsu N C. 2013. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11): 2989-3034 [DOI: 10.5194/amt-6-2989-2013]
- Li B G, Yuan H S, Feng N and Tao S. 2009. Comparing MODIS and AERONET aerosol optical depth over China. *International Journal of Remote Sensing*, 30(24): 6519-6529 [DOI: 10.1080/01431160903111069]
- Li S S, Chen L F, Xiong X Z, Tao J H, Su L, Han D and Liu Y. 2013. Retrieval of the haze optical thickness in North China Plain using MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5): 2528-2540 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2214038]
- Li Z B, Wang N, Zhang Z L, Wang T T, Tao J H, Wang P, Ma S L, Xu B B and Fan M. 2020. Validation and analyzation of MODIS aerosol optical depth products over China. *China Environmental Science*, 40(10): 4190-4204 (李忠宾, 王楠, 张自力, 王甜甜, 陶金花, 王萍, 马双良, 徐奔奔, 范萌. 2020. 中国地区MODIS气溶胶光学厚度产品综合验证及分析. *中国环境科学*, 40(10): 4190-4204) [DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0466]
- Liang L W, Wang Z B, Fang C L and Sun Z. 2019. Spatiotemporal differentiation and coordinated development pattern of urbanization and the ecological environment of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Acta Ecologica Sinica*, 39(4): 1212-1225 (梁龙武, 王振波, 方创琳, 孙湛. 2019. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局. *生态学报*, 39(4): 1212-1225) [DOI: 10.5846/stxb201809162015]
- Liang Y Z, Ge Y and Wang J H. 2015. Review of geostatistical-based downscaling. *Remote Sensing Technology and Application*, 30(1): 1-7 (梁永忠, 葛咏, 王江浩. 2015. 基于地统计学的尺度下推方法综述. *遥感技术与应用*, 30(1): 1-7) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.1.0001]
- Liu H, Gao X M, Xie Z Y, Li T T and Zhang W J. 2015. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth over Beijing-Tianjin-Hebei-Shanxi-Shandong region during 2000-2013. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35(5): 1506-1511 (刘浩, 高小明, 谢志英, 李腾腾, 张文君. 2015. 京津冀晋鲁区域气溶胶光学厚度的时空特征. *环境科学学报*, 35(5): 1506-1511) [DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0949]

- Liu N, Zou B, Feng H H, Wang W, Tang Y Q and Liang Y. 2019. Evaluation and comparison of multiangle implementation of the atmospheric correction algorithm, Dark Target, and Deep Blue aerosol products over China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(12): 8243-8268 [DOI: 10.5194/acp-19-8243-2019]
- Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S and Huang D. 2018. MODIS Collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5741-5765 [DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018]
- Malakar N K, Lary D J, Moore A, Gencaga D, Roscoe B, Albayrak A and Wei J. 2012. Estimation and bias correction of aerosol abundance using data-driven machine learning and remote sensing// 2012 Conference on Intelligent Data Understanding. Boulder, CO, USA: IEEE: 24-30 [DOI: 10.1109/CIDU.2012.6382197]
- Michalak A M, Bruhwiler L and Tans P P. 2004. A geostatistical approach to surface flux estimation of atmospheric trace gases. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D14): D14109 [DOI: 10.1029/2003JD004422]
- Munchak L A, Levy R C, Mattoo S, Remer L A, Holben B N, Schafer J S, Hostetler C A and Ferrare R A. 2013. MODIS 3 km aerosol product: applications over land in an urban/suburban region. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(7): 1747-1759 [DOI: 10.5194/amt-6-1747-2013]
- Niu F, Li C C and Mao J T. 2006. A synergic application of TERRA and AQUA on retrieving aerosol optical depth over Land. *Journal of Remote Sensing*, 10(4): 456-462 (牛峰, 李成才, 毛节泰. 2006. 利用TERRA和AQUA共同反演陆地上空的气溶胶光学厚度. *遥感学报*, 10(4): 456-462) [DOI: 10.11834/jrs.20060468]
- Schaap M, Timmermans R M A, Koelmeijer R B A, De Leeuw G and Builtjes P J H. 2008. Evaluation of MODIS aerosol optical thickness over Europe using sun photometer observations. *Atmospheric Environment*, 42(9): 2187-2197 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.11.044]
- Stathopoulou M and Cartalis C. 2009. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. *Remote Sensing of Environment*, 113(12): 2592-2605 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.017]
- Sun L, Yu H Y, Fu Q Y, Wang J, Tian X P and Mi X T. 2016. Aerosol optical depth retrieval and atmospheric correction application for GF-1 PMS supported by land surface reflectance data. *Journal of Remote Sensing*, 20(2): 216-228 (孙林, 于会泳, 傅俏燕, 王健, 田信鹏, 米雪婷. 2016. 地表反射率产品支持的GF-1 PMS气溶胶光学厚度反演及大气校正. *遥感学报*, 20(2): 216-228) [DOI: 10.11834/jrs.20165052]
- Wang H L, Liu Q, Chen Y H, Sun R, Li X, Zhang H, Wei G, Hu J and Liu T Q. 2019. Applicability of MODIS C006 aerosol products in a typical environmental area of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Environmental Science*, 40(1): 44-54 (王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强. 2019. MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性. *环境科学*, 40(1): 44-54) [DOI: 10.13227/j.hjx.201804155]
- Wang J, Brown D G and Hammerling D. 2013. Geostatistical inverse modeling for super-resolution mapping of continuous spatial processes. *Remote Sensing of Environment*, 139: 205-215 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.007]
- Wang K, Sun X J, Zhou Y B and Zhang C L. 2017. Validation of MODIS-Aqua aerosol products C051 and C006 over the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Atmosphere*, 8(9): 172 [DOI: 10.3390/atmos8090172]
- Wang X Y, Xin J Y, Wang L L and Wang Y S. 2012. Aerosol optical depth observed by Chinese sun hazemeter network and comparison with MODIS products in three typical cities in China. *Climatic and Environmental Research*, 17(1): 37-45 (王晓元, 辛金元, 王莉莉, 王跃思. 2012. 中国3个典型城市气溶胶光学厚度地基观测及其MODIS气溶胶产品精度分析. *气候与环境研究*, 17(1): 37-45) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10034]
- Wei J, Peng Y R, Guo J P and Sun L. 2019. Performance of MODIS Collection 6.1 Level 3 aerosol products in spatial-temporal variations over land. *Atmospheric Environment*, 206: 30-44 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.03.001]
- Xie Y Y, Wang Y X, Zhang K, Dong W H, Lv B L and Bai Y Q. 2015. Daily estimation of ground-level PM_{2.5} concentrations over Beijing using 3 km resolution MODIS AOD. *Environmental Science and Technology*, 49(20): 12280-12288 [DOI: 10.1021/acs.est.5b01413]
- Yan L B, Liu X D. 2009. Seasonal variation of atmospheric aerosol and its relation to cloud fraction over Beijing-Tianjin-Hebei region. *Research of Environmental Sciences*, 22(8): 924-931 (晏利斌, 刘晓东. 2009. 京津冀地区气溶胶季节变化及与云量的关系. *环境科学研究*, 22(8): 924-931) [DOI: 10.13198/J.res.2009.08.52.yanlb.019]
- Yang Y K, Sun L, Wei J, Tian X P and Jia C. 2016. Verification of MODIS C5 and C6 and their regional adaptability evaluation. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 35(5): 17-27 (杨以坤, 孙林, 韦晶, 田信鹏, 贾臣. 2016. MODIS C5、C6气溶胶产品验证及区域适应性评价. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 35(5): 17-27) [DOI: 10.16452/j.cnki.sd-kjzk.2016.05.002]
- Yi N N, Zhang L, Liu W P, Tian P F and Dong Z L. 2017. Optical characteristics and radiative effects of atmospheric aerosol over Northwest China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 41(2): 409-420 (衣娜娜, 张镭, 刘卫平, 田鹏飞, 董礼雷. 2017. 西北地区气溶胶光学特性及辐射影响. *大气科学*, 41(2): 409-420) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15272]
- Zhang J. 2018. Assessment, mergence of satellite aerosol products, and their applications in estimating regional PM_{2.5} concentrations. Lanzhou: Lanzhou University (张婕. 2018. 卫星气溶胶产品评估与融合改进及其在区域PM_{2.5}浓度估算中的应用. 兰州: 兰州大学)
- Zhang J, Liu H Y, Xin J Y, Zhang W Y, Xiao G J, Feng X Y and Wang L L. 2016. The comparison of MODIS and MERSI aerosol products in Shenyang. *Journal of Remote Sensing*, 20(4): 549-560 (张婕, 刘昊野, 辛金元, 张文煜, 肖国杰, 冯鑫媛, 王莉莉. 2016. 沈阳地区MODIS与MERSI气溶胶产品对比研究. *遥感学报*, 20(4): 549-560) [DOI: 10.11834/jrs.20165250]
- Zhao C, Liu Z R, Wang Q, Ban J, Chen N X and Li T T. 2019. High-

- resolution daily AOD estimated to full coverage using the random forest model approach in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Atmospheric Environment*, 203: 70-78 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.01.045]
- Zheng M, Yan C Q, Li X Y, Wang X S and Zhang Y H. 2014. A review of methods for quantifying secondary organic aerosol. *China Environmental Science*, 34(3): 555-564 (郑玫, 闫才青, 李小滢, 王雪松, 张远航. 2014. 二次有机气溶胶估算方法研究进展. *中国环境科学*, 34(3): 555-564)
- Zou B, Chen J W, Zhai L, Fang X and Zheng Z. 2017. Satellite based mapping of ground $PM_{2.5}$ concentration using generalized additive modeling. *Remote Sensing*, 9(1): 1 [DOI: 10.3390/rs9010001]

Seasonal deviation correction enhanced BGIM downscaling algorithm for remote sensing AOD products

LIANG Yu, ZOU Bin, FENG Huihui, LIU Ning

School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Satellite MODIS Aerosol Optical Depth (AOD) products based on Dark Target (DT) retrieval algorithm at 3 km resolution have been widely used in the ground air pollution monitoring. However, due to the limitations of DT retrieval algorithm, these products missed a large number of pixels with low spatiotemporal coverage and limited accuracy. By contrast, MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD products integrate products based on DT and Deep Blue (DB) retrieval algorithms. However, to some extent, DT_DB_Combined AOD products can make up for the coverage and accuracy shortcomings of MODIS 3 km DT AOD data products, the resolution of which is low. Moreover, affected by the seasonal variation of aerosol component sources and the seasonal error of surface reflectance estimation, the accuracy of MODIS AOD data products also exhibits seasonal variation. This study takes Beijing-Tianjin-Hebei region as the experimental area and uses MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD products as the material. Geostatistical Inverse Model (GIM) downscaling method, which considers the spatial covariance function differences of AOD data products at different scales, is introduced. At the same time, to consider the seasonal variation characteristics of AOD, the seasonal bias correction model for the MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD products using accurate AERONET monitoring data is developed. On this basis, the Bias-corrected GIM (BGIM) downscaling algorithm coupled with seasonal bias correction model is further proposed. The AERONET ground observation data and MODIS 3 km DT AOD products are employed as the absolute and relative evaluation reference for the BGIM downscaling results. Results show that the absolute evaluated accuracies of the downscaled MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD data, 10 km DT_DB_Combined AOD, and 3 km DT AOD data products are relatively close; the corresponding R^2 values are 0.79, 0.70, and 0.71, respectively. Compared with MODIS 3 km DT AOD products, the relative evaluated R result of the seasonal corrected MODIS 3 km DT_DB_Combined AOD data is higher than 0.93. In addition, the temporal coverage and spatial coverage are increased by 11.21% and 11.44%, respectively. The spatial coverage in spring and winter is relatively higher among four seasons. The results confirm that the BGIM downscaling algorithm can not only effectively improve the resolution and accuracy of MODIS 10 km DT_DB_Combined AOD products, but also promote the spatiotemporal coverage compared with MODIS 3 km AOD products.

Key words: remote sensing, AOD, downscaling, BGIM, spatial-temporal statistics, Beijing-Tianjin-Hebei

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41871317); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0206205); Innovation Driven Program of Central South University (No. 2018CX016)