

DOI:10.13203/j.whugis20150390



文章编号:1671-8860(2017)06-0789-08

# 一种 Aura 卫星遥感臭氧产品的修复方法

彭晓琳<sup>1</sup> 沈焕锋<sup>1</sup> 曾超<sup>1</sup> 张良培<sup>2</sup> 何宗宜<sup>1</sup>

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**遥感臭氧产品对于监测大气臭氧的时空分布及变化规律十分重要。然而,搭载于 Aura 卫星上的臭氧监测仪器提供的臭氧总量产品 OMTO3e(ozone monitoring total ozone level 3 expanded),自 2006 年末开始出现信息缺失问题,每个数据的缺失区域占到三分之一甚至更多,严重阻碍了该产品的正常使用。根据 OMTO3e 数据的特点,针对包括中国大陆的矩形区域提出了一种时相拟合合法来进行缺失数据的修复。该方法考虑多个时相的空间信息,首先选取参考像元,然后利用参考像元求得回归关系,并通过加权求和得到缺失数据的预测值。模拟实验和真实实验证明,相对于传统方法,所提方法具有更高的修复精度。

**关键词:**Aura 卫星;遥感臭氧产品;数据缺失;时相拟合

**中图法分类号:**P237

**文献标志码:**A

臭氧是地球大气层中的一种微量气体,虽然大气中臭氧总量只占空气的几百万分之一,但它对于整个大气环境及生态系统产生了非常重要的影响。平流层中臭氧聚集在一起形成臭氧层。臭氧层<sup>[1]</sup>是地球的天然保护伞,通过吸收太阳紫外辐射中的有害波段来保护地球的生态系统。20 世纪 80 年代,科学家们通过分析观测资料发现了南极洲上空的臭氧层空洞现象<sup>[2-3]</sup>。为阻止臭氧层的进一步变薄,世界各国共同签订了一项国际条约,希望在今后几十年里臭氧层能够慢慢恢复<sup>[4-5]</sup>。近地面大气中较高浓度的臭氧对人类健康<sup>[6-7]</sup>及地表的生态系统<sup>[8-9]</sup>构成极大的威胁。目前乃至未来几十年,大多数国家的近地面臭氧污染现象将会加剧<sup>[10]</sup>。另外,臭氧显著影响着对流层-平流层大气动力、热力、辐射、化学等过程,在全球气候和环境变化中起着非常重要的作用<sup>[11-12]</sup>。因此,研究臭氧的空间分布和时序变化具有重要意义。

卫星数据能提供长时序、全球、高精度的臭氧时空信息。最早利用卫星观测手段来获取臭氧数据的是太阳后向散射紫外仪(solar backward ultraviolet, SBUV)和臭氧总量测绘光谱仪(total ozone mapping spectrometer, TOMS)的系列仪

器<sup>[13]</sup>。目前,由搭载在 Aura 卫星上的臭氧监测仪器(ozone monitoring instrument, OMI)来替代 TOMS 继续对大气臭氧总量进行全球覆盖观测。OMI<sup>[14]</sup>传感器是新一代的大气成分探测传感器,相对于其他臭氧传感器,它具有更高的空间分辨率和每日一次全球覆盖的优势。OMI 于 2004 年 10 月 1 日开始提供臭氧总量数据,然而受到行异常的影响,于 2006 年末其获取的臭氧总量产品 OMTO3e(ozone monitoring total ozone level 3 expanded)开始出现信息丢失,并逐渐加剧。2009 年之后<sup>[15]</sup>这种缺失最为严重,导致 1/3 甚至 1/2 的臭氧监测遭受了严重影响,使得监测臭氧总量的分布和变化等方面的研究受到了极大的限制。因此,如何修复缺失信息得到完备的臭氧总量产品成为一个重要的研究方向。

然而,国内外针对 OMI 臭氧总量数据进行修复的研究比较少,但有其它遥感数据的修复方法可供借鉴。最为普遍的方法是插值方法,如最邻近插值法、双线性插值法、反距离加权法<sup>[16-17]</sup>以及克里金插值法<sup>[18-20]</sup>等。其次,一些数字图像补绘技术<sup>[21-22]</sup>也可用于遥感数据死像元的修复,并可获得比插值方法更优的结果。这类方法是利用数据本身的空间信息来修复缺失,当缺失区域的范

收稿日期:2016-01-12

项目资助:国家自然科学基金(41271376, 41422108);湖北省自然科学基金(2015CFA002);长江学者和创新团队发展计划(IRT1278)。

第一作者:彭晓琳,博士,主要从事全球臭氧产品重建的理论与方法研究。pxlin2014@whu.edu.cn

通讯作者:沈焕锋,博士,教授。shenhf@whu.edu.com

围较大时其修复结果往往会出现空间不连续的情况,而本文所研究的臭氧总量数据正是这种缺失区域的范围较大的情况。

针对现有方法的不足,本文提出了一种基于时相拟合的修复方法。该方法根据臭氧数据在时序上的连续变化特征,利用多个时相的数据作为辅助,通过建立回归模型对缺失区域进行修复。针对中国区域中的缺失信息进行实验,与反距离加权、克里金方法比较,验证了本文方法的优越性。

### 1 时相拟合法

将待修复的 OMT03e 数据定义为目标数据,用来修复目标数据的多个时相的数据定义为辅助数据。目标数据的缺失像元定义为目标像元,目标像元所处的位置定义为目标位置。图 1 展示的 Aura 卫星上 OMI 传感器提供的 OMT03e 产品的臭氧总柱量(total column ozone, TCO),单位是多布森(dobson unit, DU)。可以看出,图 1 中代表缺失区域的白色条带的宽度较大。本文中所有臭氧制图均借助 ARCGIS 软件完成(该软件提供 WGS-84 坐标系统、墨卡托投影的世界地图),裁切出实验区域制成底图,并在此基础上进行分级设色。图 2 展示的是 3 个时间上连续的数据的示意图。因为缺失区域的位置会随时间变动,因此可以选取邻近目标数据的多个时相的数据作为辅助,以确保辅助数据上的有效值能够完全覆盖目标数据上的缺失区域。从图 2 中可以进一步发现,数据  $t-1$  和  $t+1$  能够完全覆盖数据  $t$  的缺失区域,而  $t$  中 90% 的缺失区域能够被这两个数据的有效值共同覆盖。基于以上性质,本文提出一种时相拟合修复方法,利用两个相邻时相的数据作为辅助数据,通过与目标数据分别建立回归关系对缺失进行预测,依据辅助数据对目标数据的不同贡献对回归结果进行加权求和,最终拟合出缺失区域的预测值。图 3 是本文算法的流程图。

#### 1.1 参考像元选取

受大气环流的影响,臭氧数据在时间序列上的变化较大,特别是在南北半球的中高纬度地区。不过,这种变化在短时间、小范围内是轻微的。因此,可以合理地认为,在时间和空间上与目标像元最为邻近的像元跟目标像元具有一致的时空变化规律。如图 2 所示,数据  $t$  中红色三角形标记的是目标像元,首先确认数据  $t-1$  和数据  $t+1$  中

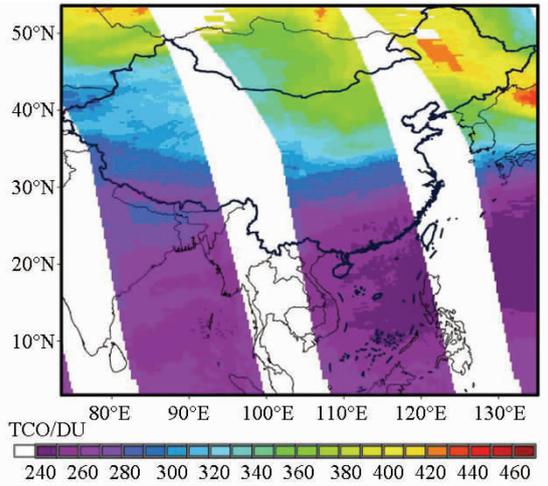


图 1 2010 年 12 月 25 日真实数据

Fig. 1 Actual Data Set Acquired on December 25, 2010

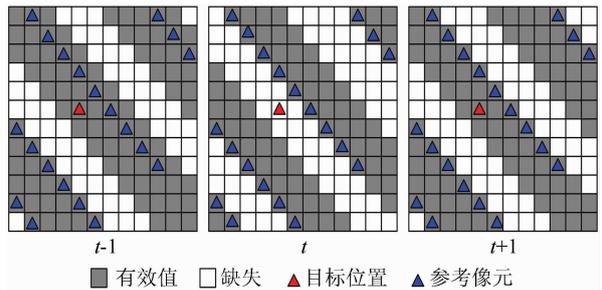


图 2 参考像元选取的原理图

Fig. 2 Diagram of Reference Pixels Selection

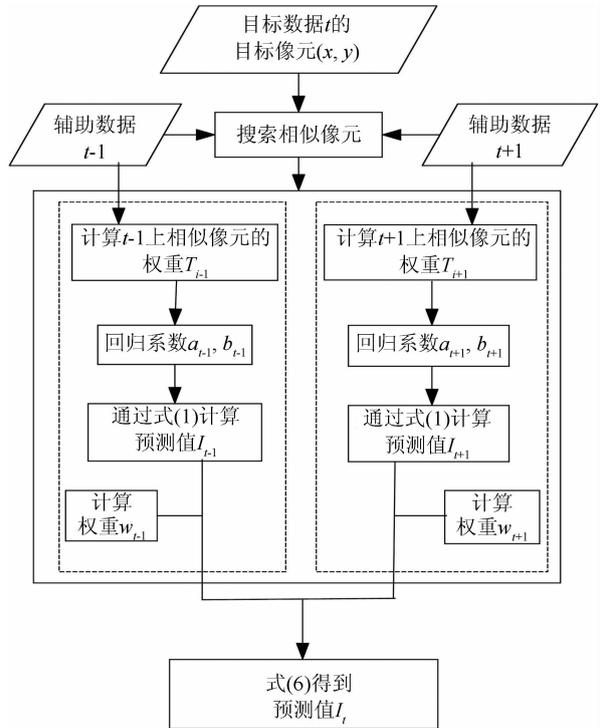


图 3 本文算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the Proposed Algorithm

该位置具有有效值(灰色),再根据距离目标位置最近且 3 个数据都具有有效值的规则来选取参考像元。根据来自先前研究的灵感<sup>[23]</sup>,针对每个目标像元,给定一个初始值为 3 的自适应窗口来搜索参考像元。经过一系列优化实验,将参考像元的数目  $N$  设定为 20。必须提到的是, $N$  值较小会导致拟合结果不稳定,而  $N$  过大会增加参考像元与目标位置的空间距离,空间相似性不能被保证。并且,过大的  $N$  值也会降低计算效率。如果选取的参考像元数目没有达到 20,将搜索窗口的尺寸加 2。为了避免窗口过大导致目标像元和参考像元的空间差异增加并且运行效率降低,设置窗口的最大值为 71。如果窗口达到最大值,而参考像元的数目没有达到 20,该目标像元被标记为离群点。在所有目标像元修复之后,利用反距离加权法得到离群点的预测值。

1.2 时相拟合

针对目标像元与每个辅助数据目标位置处的有效值,分别建立一个线性回归关系,并给出目标

$$a_{t-1} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i \times (I_t(x_i^s, y_i^s) - I_t(\mathbf{X}^s, \mathbf{Y}^s)) (I_{t-1}(x_i^s, y_i^s) - I_{t-1}(\mathbf{X}^s, \mathbf{Y}^s))}{\sum_{i=1}^N T_i \times (I_{t-1}(x_i^s, y_i^s) - I_{t-1}(\mathbf{X}^s, \mathbf{Y}^s))^2}$$

$$b_{t-1} = I_t(\mathbf{X}^s, \mathbf{Y}^s) - a_{t-1} \times I_{t-1}(\mathbf{X}^s, \mathbf{Y}^s) \tag{3}$$

式中, $I_{t-1}(x_i^s, y_i^s)$ 为  $t-1$  上第  $i$  个参考像元的臭氧总量值; $I_t(\mathbf{X}^s, \mathbf{Y}^s)$ 和  $I_{t-1}(\mathbf{X}^s, \mathbf{Y}^s)$ 为目标数据及辅助数据  $t-1$  上所有参考像元的均值。其中辅助数据  $t-1$  上每个参考像元的权重为:

$$T_i = (1/D_i) / \sum_{i=1}^N (1/D_i) \tag{4}$$

$$D_i = |I_{t-1}(x_i^s, y_i^s) - I_{t-1}(x, y) + \Delta| \times ((x_i^s - x)^2 + (y_i^s - y)^2) \tag{5}$$

$T_i \in [0, 1]$ ,所有参考像元的权重之和为 1。 $\Delta$  是一个极小值,为了避免  $D_i$  等于 0。求得  $T_i$  代入式(3)中,即可求得  $a_{t-1}$  和  $b_{t-1}$ 。用同样的方法可以求得  $a_{t+1}$  和  $b_{t+1}$ 。由于两个辅助数据的参考像元跟目标像元的相似度并不一致,即两个辅助数据所得到的预测值对目标像元的贡献不一样,因此目标像元的初步预测值由以上两个预测值的加权和求得:

$$\hat{I}_t(x, y) = w_{t-1} \times I'_{t-1}(x, y) + w_{t+1} \times I'_{t+1}(x, y) \tag{6}$$

式中, $\hat{I}_t(x, y)$ 为目标像元的最终预测值; $w_{t-1}$  和  $w_{t+1}$ 代表权重。借鉴高斯核函数来表示权重:

$$w_{t-1} = 1/C \times \exp(-d_{t-1}^2/h^2)$$

$$w_{t+1} = 1/C \times \exp(-d_{t+1}^2/h^2) \tag{7}$$

像元的预测值:

$$I'_{t-1}(x, y) = a_{t-1} \times I_{t-1}(x, y) + b_{t-1}$$

$$I'_{t+1}(x, y) = a_{t+1} \times I_{t+1}(x, y) + b_{t+1} \tag{1}$$

式中,下标  $t-1$  和  $t+1$  代表目标数据的获取时间; $I'_{t-1}(x, y)$ 和  $I'_{t+1}(x, y)$ 为利用每个辅助数据  $t-1$  或  $t+1$  与目标数据  $t$  建立的不同的回归关系所拟合出的预测值; $I_{t-1}(x, y)$ 和  $I_{t+1}(x, y)$ 分别为辅助数据  $t-1$  和  $t+1$  中位于目标位置处的臭氧总量值。 $a_{t-1}, b_{t-1}, a_{t+1}$  和  $b_{t+1}$ 是回归系数。式中的  $(x, y)$ 代表目标像元的位置,目标像元的所有参考像元表示为:

$$\mathbf{X}^s = [x_1^s, x_2^s, x_i^s \dots, x_N^s]$$

$$\mathbf{Y}^s = [y_1^s, y_2^s, y_i^s \dots, y_N^s] \tag{2}$$

式中, $\mathbf{X}^s$  和  $\mathbf{Y}^s$  分别代表参考像元  $x$  轴和  $y$  轴的坐标向量。假设参考像元与目标像元具有相同的回归关系,将参考像元带入式(1)中,组建一系列方程组,利用加权最小二乘法求得回归系数。以辅助数据  $t-1$  为例,式(1)中的回归系数为:

其中, $h$  的值由目标数据决定, $h = 2 \times \sigma$ , $\sigma$  为目标数据中所有参考像元的标准差。

$w_{t-1}$  和  $w_{t+1}$  需满足  $0 \leq w_{t-1}, w_{t+1} \leq 1$ , 以及  $w_{t-1} + w_{t+1} = 1$ 。 $C$  是归一化参数:

$$C = \exp(-\overline{d_{t-1}^2}/h^2) + \exp(-\overline{d_{t+1}^2}/h^2) \tag{8}$$

式中, $d_{t-1}$  和  $d_{t+1}$  是目标数据分别和两个辅助数据中第  $i$  个参考像元的欧式距离:

$$d_{t-1} = \| I_{t-1}(x_i^s, y_i^s) - I_t(x_i^s, y_i^s) \|^2$$

$$d_{t+1} = \| I_{t+1}(x_i^s, y_i^s) - I_t(x_i^s, y_i^s) \|^2 \tag{9}$$

利用时相相合法能够修复目标数据中 90% 的缺失信息,而剩下 10% 的缺失信息若不能满足两个辅助数据在该处都具有有效值,则利用在该位置处具有有效值的单个辅助数据( $t-1$  或者  $t+1$ ) 进行修复,只需建立一组线性关系,利用单个数据与目标数据寻找参考像元,通过加权最小二乘法计算出回归系数,得到的预测值  $I'_{t-1}(x, y)$  或者  $I'_{t+1}(x, y)$  即为最后结果。

2 中国区域的臭氧修复实验

OMTO3e 臭氧产品的空间分辨率为  $0.25 \times 0.25$ ,由 NASA 网站下载 (<http://daac.gsfc>).

nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/). 本文的研究区域是  $53^{\circ}\text{N}\sim 3^{\circ}\text{S}$ ,  $73^{\circ}\text{W}\sim 135.1^{\circ}\text{E}$ , 包括中国大陆, 为一矩形区域, 数据的尺寸为 203(行)  $\times$  249(列)。本文通过两组模拟实验和一组真实实验, 并将本文方法与反距离加权、克里金插值方法进行比较, 来验证本文方法的精度及可用性。

## 2.1 臭氧缺失修复的模拟实验

2004年10月至2006年末, OMTO3e 数据较为完整。为了进行精度验证, 选取2004~2006年的高质量数据, 同时选取2006年之后的降质数据模拟缺失区域, 即用2006年之后降质数据的缺失区域代替同样位置处2006年之前的高质量数据。图4中的示意图详细地展示了模拟实验中模拟数据生成的过程。以图4(a)中的缺失数据为掩膜(如图4(b)), 将掩膜应用于目标数据图4(c)中, 从而生成模拟数据(如图4(d)), 并以图4(c)作为验证数据, 为模拟实验提供定量评价。

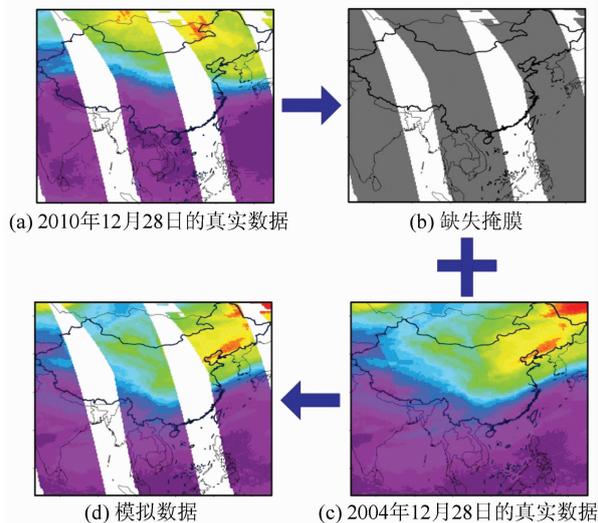


图4 模拟数据生成示意图

Fig. 4 Simulated Mask of Degraded Data Applied to the Good Quality Data

为保证模拟实验结果具有代表性, 本文设计了两组实验, 分别选取了不同年份的数据生成模拟数据。选取2004年12月22日~31日连续10d的数据作为第一组模拟实验数据, 同时选取2010年12月22日~31日同样连续10d的数据来模拟缺失信息, 即利用后者缺失位置处的无效值来代替前者相同位置处的有效值, 每个数据有大概15000个缺失像元。第二组模拟实验数据是选取2006年1月28日~2月6日连续10d的数据, 对应的模拟缺失数据是来自2012年1月28日~2月6日连续10d的数据, 每个数据大约有9700个缺失像元。通过定性观察可以判定修

复结果空间上是否连续, 是否存在条带或者其他异常情况, 因此从两组模拟实验中分别挑选一个目标数据展示在图5和图6中, 来评价修复方法对于OMTO3e数据是否适用。

图5(a)展示的是目标数据, 以2004年12月28日的真实数据作为模拟数据, 用2010年12月28日的真实数据模拟缺失区域。图5(e)为2004年12月28日的真实数据, 从图5(a)中可以看出, 中国大陆地区臭氧总量的高值集中在东北部, 臭氧总量的值域为240~460 DU, 而缺失区域的宽度达10个经度, 约1000 km。若利用自身空间信息作为参考来修复如此宽的缺失区域, 会导致修复结果出现空间不连续性, 如图5(b)和图5(c)所示。图5(b)是反距离加权法的修复结果, 不仅空间不连续, 而且出现了过平滑的现象。图5(c)是克里金插值法的修复结果, 其权重是基于半方差函数通过无偏估计来确定的, 所以其结果比图5(b)多了一些细节信息, 但也具有空间不连续性。图5(d)是本文提出的时相拟合方法的修复结果, 可以明显看出该结果好于图5(b)和图5(c), 没有出现空间不连续和过平滑的现象, 与图5(e)所示的真实数据基本一致。

图6(a)展示的是2006年2月3日的数据作为目标数据, 缺失区域用2012年2月3日的数据来模拟, 可以看出其缺失区域的宽度略小, 但臭氧总量的值域扩大到220~540 DU, 说明该时间段的臭氧时空变化较大。图6(b)和图6(c)分别是反距离加权法和克里金插值法的修复结果, 同样出现了空间不连续和过平滑的现象。图6(d)的时相拟合法的结果是最好的, 最接近图6(e)所示的2006年2月1日的真实数据。

图7展示的是上述两个模拟实验的散点图, 分别绘制了目标数据缺失区域的真实数据与三种方法修复结果的散点图。从图7(a)和图7(d)中可以看出, 反距离加权法的散点图较为分散, 并且存在许多离群点, 这说明反距离加权法的修复结果相对于真实值有很大的误差。而图7(b)和图7(e)展示的克里金插值法的散点图要优于反距离加权法, 但图7(c)和图7(f)展示的时相拟合法的散点图最贴近真实值, 并且离群点也是最少的。

定量评价是通过计算均方根平方差(RMSE)来评估预测值与真实值之间的差异。表1展示的是两组模拟实验的定量评价结果。表1的结果与上述的两个示例的目视结果表现一致, 即时相拟合法的RMSE值是最低的, 而反距离加权法的RMSE值是最高的, 克里金插值法的RMSE值处于两者之间。对比两组模拟实验, 可以发现不论

是第一组模拟实验的缺失宽度较大还是第二组模拟实验的时空变化较大,相对于另外两种方法,时

相符合法的 RMSE 值比较稳定,表现出极大的稳健性。

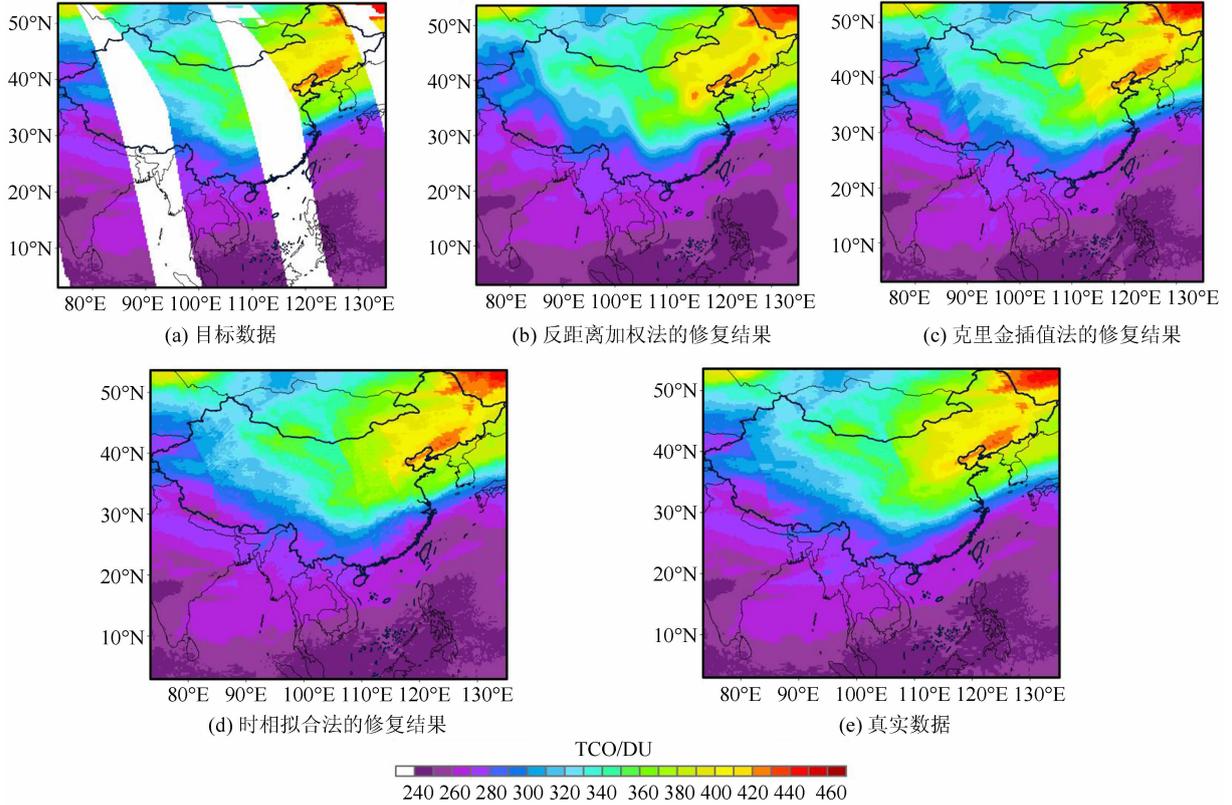


图 5 第一组模拟实验

Fig. 5 The First Simulated Experiments

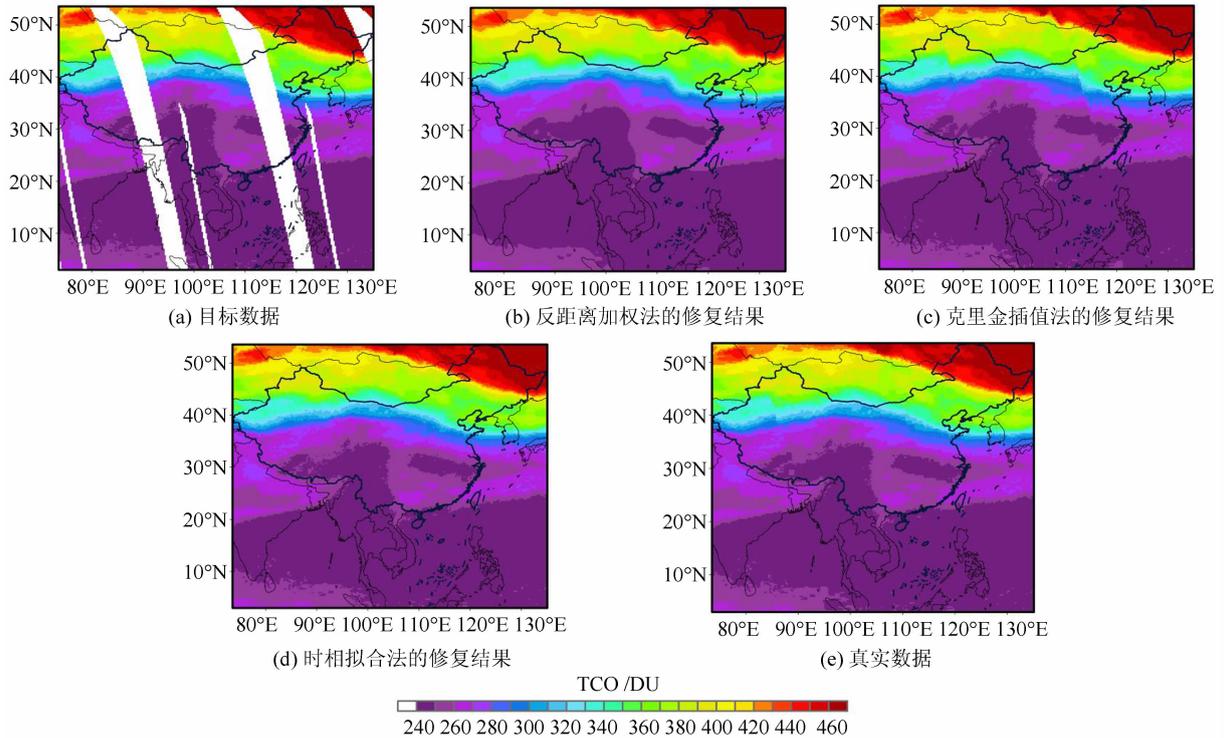


图 6 第二组模拟实验

Fig. 6 The Second Simulated Experiments

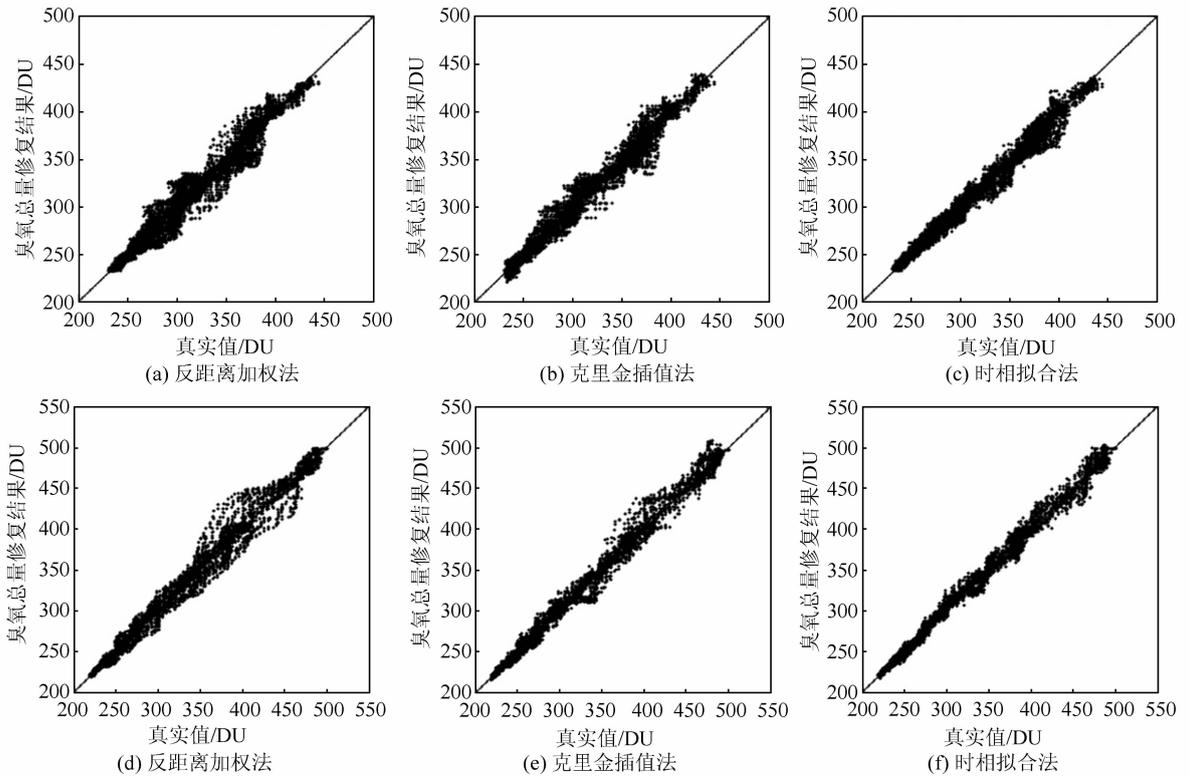


图7 散点图,其中(a)~(c)对应图5的模拟实验,(d)~(f)对应图6的模拟实验

Fig. 7 Scatter Plots for Two Simulated Experiments Mentioned Above

表1 两组模拟实验分别使用反距离加权、克里金以及时相拟合法进行修复的RMSE评价结果

Tab. 1 The Accuracy of Recovered Results Using IDW, Kriging and Temporal Fitting Method for the Two Groups of Simulated Experiments

日期	反距离加权	克里金	时相拟合
2004-12-23	5.496 9	5.137 0	4.186 0
2004-12-24	7.196 0	6.109 4	5.274 5
2004-12-25	5.762 3	5.451 7	4.872 2
2004-12-26	8.086 3	6.618 3	6.466 1
2004-12-27	7.501 9	6.470 4	5.745 7
2004-12-28	8.776 4	7.246 0	5.893 3
2004-12-29	11.039 9	9.429 2	8.897 9
2004-12-30	12.386 7	10.295 7	7.791 6
2006-01-29	8.788 3	6.390 8	6.009 0
2006-01-30	8.364 2	6.203 5	4.782 4
2006-01-31	7.729 1	5.710 2	4.910 7
2006-02-01	8.301 1	6.679 7	5.469 4
2006-02-02	9.244 3	6.840 2	5.521 0
2006-02-03	9.295 0	6.784 3	5.971 7
2006-02-04	10.801 4	9.024 7	8.002 1
2006-02-05	9.264 3	7.086 1	6.378 4

## 2.2 真实实验

为了更进一步地证明时相拟合法的修复效果,本文给出了一组真实实验,选取2012年1月28日~2月6日连续10 d的数据作为实验数据。这组数据的时空变化较大,并且曾用于模拟第二

组模拟实验的缺失区域。用这组数据的进行真实实验能更为有力地说明时相拟合法的适用性。选择其中3个目标数据显示在图8中,通过目视观察来判别本文方法的修复效果。图8(a)、图8(c)和图8(e)是3个时间上连续的目标数据,可以看出缺失区域的位置随时间变动,臭氧总量数据的值域为220~540 DU,存在明显的时空变化特征。图8(b)、8(d)和8(f)是时相拟合法的修复结果,可以看出该方法保持了数据的空间连续性,且没有噪声点出现,充分地证明了本文提出的时相拟合法对于OMTO3e数据的缺失修复是适用的。

## 3 结语

臭氧总量产品OMTO3e由搭载在Aura卫星上的OMI传感器所提供,它为研究臭氧总量的空间分布和时序变化提供了重要数据源。本文针对该产品上的缺失信息,提出了一种时相拟合修复方法。该方法利用多时相数据的互补信息,具有更好的修复性能。针对包括中国大陆的矩形区域的缺失信息进行两组模拟实验,定性和定量评价证明了本文方法的修复结果具有较好的时空连续性、一致性和完整性。后续研究可以基于误差校正的方式,探讨进一步提高修复精度的可行性。

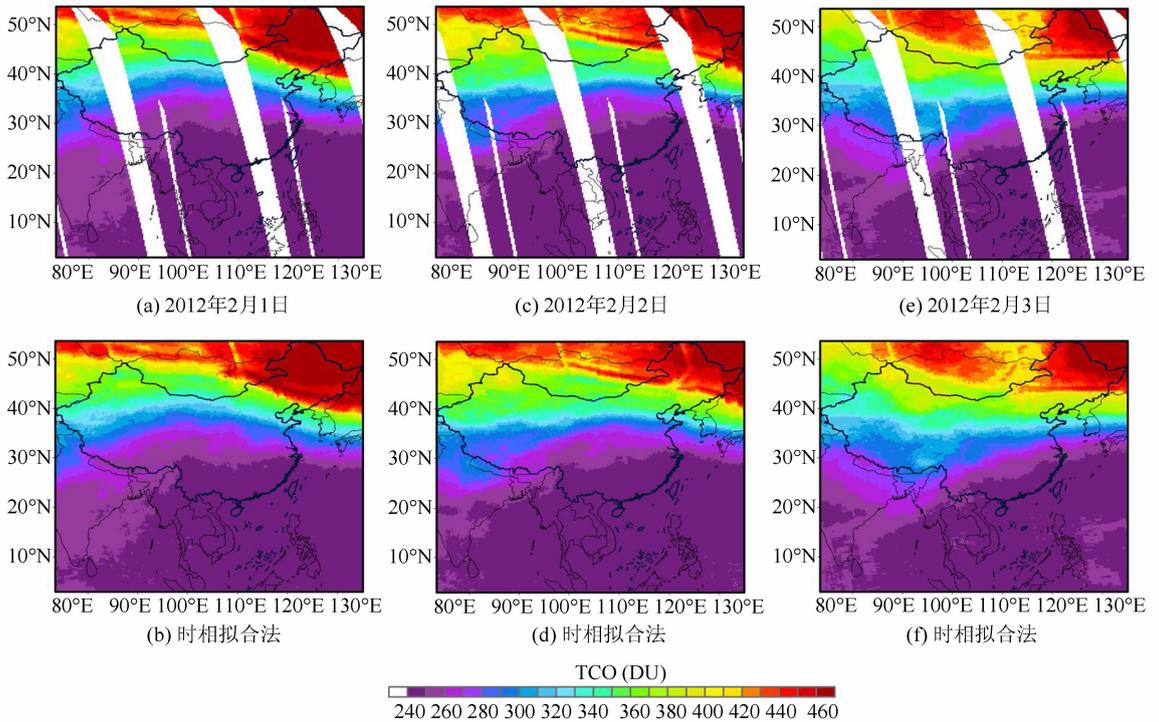


图 8 真实实验

Fig. 8 The Actual Experiments

## 参 考 文 献

- [1] Hartley W N. On the Probable Absorption of Solar Radiation by Atmospheric Ozone[J]. *Chem News*, 1880, 39(1): 111-128
- [2] Herman J R, Mcpeters R, Larko D. Ozone Depletion at Northern and Southern Latitudes Derived from January 1979 to December 1991 Total Ozone Mapping Spectrometer Data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1993, 98 (D7): 12 783-12 793
- [3] Staehelin J, Harris N R P, Appenzeller C, et al. Ozone Trends: A Review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(2): 231-290
- [4] Hadjinicolaou P, Pyle J A, Harris N R P. The Recent Turnaround in Stratospheric Ozone Over Northern Middle Latitudes: A Dynamical Modeling Perspective [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(12):273-291
- [5] Kiesewetter G, Sinnhuber B M, Weber M, et al. Attribution of Stratospheric Ozone Trends to Chemistry and Transport: A Modelling Study[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2010, 10 (7): 17 491-17 525
- [6] Lippmann M. Health Effects of Ozone: A Critical Review[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1989, 39(5):672-695
- [7] White M. Exacerbations of Childhood Asthma and Ozone Pollution in Atlanta[J]. *Environmental Research*, 1994, 65(1): 56-68
- [8] Heck W W, Taylor O C, Adams R, et al. Assessment of Crop Loss from Ozone[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1982, 32(4) : 353-361
- [9] Reich P B, Amundson R G. Ambient Levels of Ozone Reduce Net Photosynthesis in Tree and Crop Species[J]. *Science*, 1985, 230(4 725): 566-570
- [10] Riahi K, Grübler A, Nakicenovic N. Scenarios of Long-Term Socio-economic and Environmental Development Under Climate Stabilization[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2007, 74 (7): 887-935
- [11] Ramanathan V, Callis L B, Boughner R E. Sensitivity of Surface Temperature and Atmospheric Temperature to Perturbations in the Stratospheric Concentration of Ozone and Nitrogen Dioxide[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1976, 33(6): 1 092-1 112
- [12] Ramanathan V, Cicerone R J, Singh H B, et al. Trace Gas Trends and Their Potential Role in Climate Change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(D3): 5 547-5 566
- [13] Bhartia P K, McPeters R, Stolarski R, et al. A Quarter Century of Ozone Observations by SBUV and TOMS[C]. Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium, Kos, Greece, 2004

- [14] Levelt P F, Oord G H J D, Dobber M R, et al. The Ozone Monitoring Instrument[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1 093-1 101
- [15] Yan H, Chen L, Tao J, et al. Corrections for OMI SO<sub>2</sub> BRD Retrievals Influenced by Row Anomalies [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(11): 2 635-2 646
- [16] Mueller T G, Pusuluri N B, Mathias K K, et al. Map Quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Interpolation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 2 042-2 047
- [17] Xue Shuqiang, Yan Yuanxi. Generalized Inverse Distance Weighting Method for Spatial Interpolation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12): 1 435-1 439(薛树强, 杨元喜, 广义反距离加权空间推估法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(12): 1 435-1 439)
- [18] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*[M]. UK: Oxford University Press, 1997
- [19] Zhang C, Li W, Travis D. Gaps-Fill of SLC-off Landsat ETM+ Satellite Image Using a Geostatistical Approach[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(22): 5 103-5 122
- [20] Zhang Shengkai, Xiao Feng, Li Fei, et al. DEM Development and Precision Analysis in Two Local Areas of Antarctica, Using CryoSat-2 Altimetry Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1 434-1 439(张胜凯, 肖峰, 李斐, 等, 基于 CryoSat-2 测高数据的南极局部地区 DEM 的建立与精度评定[J], *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(11): 1 434-1 439)
- [21] Shen H, Zhang L. A MAP-based Algorithm for Destriping and Inpainting of Remotely Sensed Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1 492-1 502
- [22] Cheng Q, Shen H, Zhang L, et al. Inpainting for Remotely Sensed Images with a Multichannel Non-local Total Variation Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 175-187
- [23] Zeng C, Shen H, Zhang L. Recovering Missing Pixels for Landsat ETM+ SLC-off Imagery Using Multi-temporal Regression Analysis and a Regularization Method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 182-194

## A Method for the Recovery of Aura Satellite Remote Sensing Ozone Products

PENG Xiaolin<sup>1</sup> SHEN Huanfeng<sup>1</sup> ZENG Chao<sup>1</sup> ZHANG Liangpei<sup>2</sup> HE Zongyi<sup>1</sup>

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 The State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Total ozone data plays is essential for monitoring the spatial distribution and temporal change in the total ozone. However, since late 2006, total ozone production from OMI (ozone monitoring instrument) aboard on Aura OMT03e satellite began show defects resulting from an OMI instrument anomaly. The missing parts accounting for one third or even more of one set data, which is a serious obstacle for normal usage. Therefore, the recovery pf missing OMT03e data is necessary. In this paper, a multi-temporal fitting model, based on the characteristics of OMT03e data, is proposed to reconstruct the missing data. Experimental results and comparative quantitative evaluation, verify that the proposed method has higher feasibility and superior to traditional methods.

**Key words:** Aura satellite; remote sensing ozone product; missing data; temporal fitting

**First author:** PENG Xiaolin, PhD, specialize in image restoration and super-resolution. E-mail: pxlin2014@whu.edu.cn

**Corresponding author:** SHEN Huanfeng, PhD, professor. E-mail: shenhf@whu.edu.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41271376, 41422108; the Natural Science Foundation of Hubei Province of China, No. 2015CFA002; the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University, No. IRT1278.