

VIIRS/DNB 夜间灯光月度产品插补方法对比 ——以北京为例

陈慕琳^{1,2}, 蔡红艳^{2*}

(1. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要:新一代 VIIRS/DNB(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band)夜间灯光数据因其具备更精细的时空分辨率、数据不存在饱和现象、不同年份数据可比性强等优点而迅速代替 DMSP/OLS(Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System)夜间灯光数据成为新的研究热点。但由于杂散光的污染, VIIRS/DNB 夏季数据数值缺失严重,致使数据在空间和时间上不连续,因此,插补缺失数据成为后续应用的前提。鉴于此,论文从插补结果异常值、与参照值对比、计算性能三个方面,系统比较了三次样条插值(样条)、三次 Hermite 插值(Hermite)、灰色预测模型(GM)、三次指数平滑法(指数)4 种插补方法的适用性,以期能为插补 VIIRS/DNB 夜间灯光数据提供方法选择的依据。研究结果表明:①异常值比较方面, Hermite 法未出现异常值,另外 3 种算法仅出现少量异常值(0.02%~1.34%);②与参照值的对比方面, Hermite 法与参考值接近程度最高, GM 接近程度最低,样条法和指数法介于两者中间;③算法性能比较方面,4 种方法都具备计算简单、容易编程的特点,但指数法的算法时长是另外 3 种方法的 10 倍以上。因此,综合多方表现,当插补月份前后两侧均有足够长的原始数据时,插补效果好、计算速度快、不会出现过冲现象的 Hermite 法最适宜,样条法次之;当插补月份仅单侧有足够长的数据时,适宜采用指数法(插补效果好、计算速度较慢)或 GM(插补效果偏低、计算速度快)进行插补。

关键词: VIIRS/DNB 夜间灯光;三次样条插值;三次 Hermite 插值;灰色预测模型;三次指数平滑

2011 年 10 月 28 日,美国海洋大气局(NOAA)发射了 Suomi-NPP(the Suomi National Polar-orbiting Partnership)卫星,其获取的 VIIRS/DNB(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band)夜间灯光数据被认为是 DMSP/OLS(Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System)夜间灯光数据的继任产品。作为新一代夜光产品,其空间分辨率提升至 15 弧秒(约 750 m),时间尺度精细至年、月、日,数据不存在饱和现象。同时,由于采用星上校正,不同年份间数据可比性更

强(Lee et al, 2006; Elvidge et al, 2013; Miller et al, 2013)。然而,受杂散光污染,夏季中高纬度地区的 VIIRS/DNB 数据失真严重(Qiu et al, 2017; Román et al, 2018)。为此,自 2014 年起,NOAA 提供了“vcm”(VIIRS Cloud Mask)和“vcmsl”(VIIRS Cloud Mask Stray Light)两种月度产品,其中“vcm”产品剔除了所有受杂散光影响的像元,由此导致该产品含大量缺失值,时空不连续;而“vcmsl”产品则根据 Mills 等(2013)提出的杂散光修正方法对污染数据进行了校正,更多地保留了夏季和中高纬度地区的

收稿日期:2018-04-03;修订日期:2018-09-16。

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA20010203);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4);中央高校基本科研业务费资助(创新资助项目)(2018CXZZ003)。[Foundation: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No. XDA20010203; Key Project of the Chinese Academy of Sciences, No. ZDRW-ZS-2017-4; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2018CXZZ003.]

第一作者简介:陈慕琳(1993—),女,硕士研究生,主要从事人文要素空间建模。E-mail: linmuchun@yeah.net

*通信作者简介:蔡红艳(1983—),女,博士,副研究员,研究方向为人文要素建模、土地利用变化的人文因素分析。E-mail: caihy@igsrr.ac.cn

引用格式:陈慕琳,蔡红艳. 2019. VIIRS/DNB 夜间灯光月度产品插补方法对比:以北京为例[J]. 地理科学进展, 38(1): 126-138. [Chen M L, Cai H Y. 2019. Interpolation methods comparison of VIIRS/DNB nighttime light monthly composites: A case study of Beijing. Progress in Geography, 38(1): 126-138.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.011

数据。“vcmsl”产品虽然较“vcm”产品具备时空连续的优点,但该产品存在两方面问题。首先,该产品2012及2013年因缺少校正过程需要的每月更新查找表(Look Up Table)而无数据(Liao et al, 2013),即公开获取的VIIRS/DNB数据在这2个年份的夏季中高纬度地区无可用的数据;其次,该产品的数据质量仍有待提高(Bennett et al, 2017)。由此可见,无时空连续且精度较高的可用数据已成为VIIRS/DNB月度数据推广应用的限制条件之一。

即便如此,VIIRS/DNB月度数据已经广泛应用于GDP空间分析(Zhao et al, 2017)、人口估算(Chen et al, 2015)、电力消费估算(Shi et al, 2014; 李峰等, 2018)、战争、暴动影响(Li et al, 2015; Li et al, 2017)、建成区提取(Zhang et al, 2017; 李欣欣等, 2018)等社会经济研究中。在应对VIIRS/DNB夏季数值缺失问题时,以前研究往往采用数据质量较低的“vcmsl”产品(Levin, 2017; Zhao et al, 2017; 彭建等, 2018),或是采取排除夏季月份数据的方式来规避这一问题(Li et al, 2017)。另有少部分研究者进行了初步的插补实验,如Zhao等(2017)用VIIRS/DNB月度数据拟合美国大陆GDP时,曾采用一次指数平滑法插补缺省值。但该项研究存在两方面问题:一是所采用的原始数据序列过短(仅4个月),如此容易导致插补精度不佳(沈海迪等, 2017);二是一次指数平滑法仅适用于平稳、无趋势效应的时序序列拟合(刘敬强等, 2013),而VIIRS/DNB月度数据时序序列并非呈平稳的线性变化过程,而是呈季节波动变化过程(Levin, 2017)。基于此,探索插补“vcm”产品缺省数据的新方法,系统评估插补方法的适应性,无疑成为获得精度更高、时空连续的VIIRS/DNB夜光数据的必要工作。

遥感影像的插补可分为空间插补和时序插补两大类,其中空间插补主要依据同一时期相邻像元之间的关系填补缺失像元值,时序插补则利用同一像元相邻时序的关系进行填补。对于“vcm”产品,缺失值往往大面积存在,因此时序插补更为可行。时序插补可通过时序插值和时序拟合两种方法实现,其中插值主要通过构造多项式以建立平滑曲线,常见算法如拉格朗日插值、牛顿插值、分段线性插值、Hermite插值方法以及三次样条插值等。比较这几种算法,三次样条插值算法和三次Hermite插值算法因其插值精度高、曲线平滑而被广泛应用。与插值不同,拟合通过寻求与样本差异最小的

近似函数来获取平滑曲线。两者最大的差别在于,插值曲线必然通过所有原始样本点而拟合曲线并不需要。常用的时序拟合有移动平滑法、灰色预测模型、指数平滑法等(顾朝林等, 2016),其中灰色预测模型因建模所需信息少,对样本的统计分布没有要求而成为处理小样本时间预测的有效工具(邓聚龙, 1982)。另外,指数平滑方法也因既能体现最新数据的信息,又能保留历史数据而成为最常用的时间序列预测拟合方法之一(段功豪等, 2016)。

基于此,本文将系统评价三次样条插值、三次Hermite插值、灰色预测模型、指数平滑法4种常用插补算法的适用性,旨在为VIIRS/DNB数据插补方法选择提供依据。此外,由于北京地处中高纬度地区,夏季夜光数据受杂散光污染严重,且城市发展迅速,在社会经济研究中具有代表性,因此本文选择北京市作为方法实验区,2015年5—7月VIIRS/DNB数据作为插补时段,通过异常值分析、与参考值比较分析及计算性能比较分析等探讨4种方法的适用性。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据与预处理

由于可用于插补5—7月且不受杂散光影响的连续月份最多为9个月,分别为上一年8月至同年4月,以及同年8月至下一年4月,因此,在实验过程中,以2015年5—7月前后9个月的“vcm”灯光数据作为填补的原始数据,并以同年5—7月的“vcmsl”校正产品作为插补对比的参考数据。灯光数据均来自NOAA(<https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>)。

由于受杂散光影响,北京市2015年5—7月的“vcm”产品像元值全部为0。但当VIIRS/DNB数据未受杂散光污染时,其夜间灯光分布基本能够勾勒出北京市的建成情况。2014年8月至2016年4月(不包含2015年5—7月)北京市的灯光辐射值在 $-0.15 \sim 475 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 区间内,该时段内的像元时序中位数图显示(图1):东、西城区的辐射值位于 $35 \sim 55 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 之间;其次为朝阳、海淀、石景山、丰台四城区,大部分辐射值在 $15 \sim 35 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 之间;顺义、通州、大兴三区的辐射值位居第三,大部分在 $5 \sim 15 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 之间;其余区县因建设用地面积较小,其辐射值也最低。

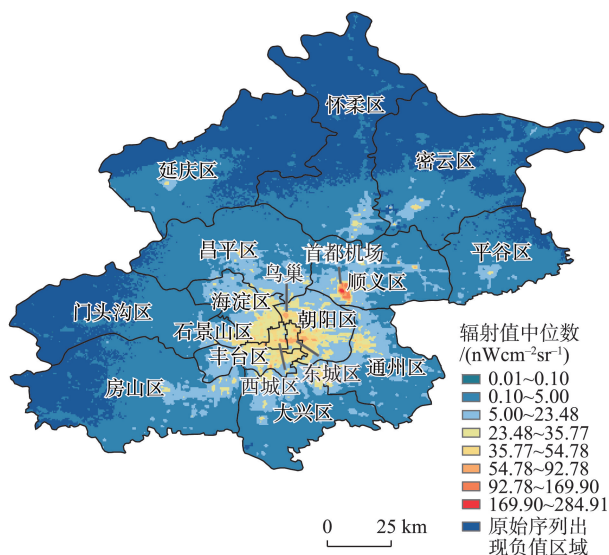


图1 2014年8月至2016年4月(不包含2015年5—7月)
“vcm”产品辐射值中位数图

Fig.1 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Cloud Mask
(vcm) composites' median value of August 2014 to April 2016
(excluding May to July 2015)

VIIRS/DNB月度产品虽然剔除了闪电、月光照射及云覆盖的影响,但没有去除极光、火光、船只灯光等短暂性光源和背景噪声,以至影像出现极大异常值像元和负值像元。为了剔除背景噪声影响,在插补过程中,负值像元赋予0值(Shi et al, 2014; 李翔等, 2017);另外,鉴于中位数不容易受到极值的干扰(陈青燕等, 2016),本文选取插补时段内最大中位数值 $285 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 作为阈值,并将辐射值大于 $285 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 的像元重新赋值为 $285 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$,以过滤火光等极大值像元;同时,认为插补结果超出 $[0, 285]$ 区间的为异常值。

1.2 研究方法

本文主要针对三次样条插值、三次 Hermite 插值、灰色预测模型、三次指数平滑法4种插补方法进行适用性评价,算法均在 MATLAB 环境下编程实现。算法的适用性评价主要通过异常值分析、与参考值比较分析及计算性能比较3个方面进行,其中异常值分析主要比较4种算法结果的异常值数量及其空间分布范围,当出现数量较多或数值较大的异常值时,则认为插补结果不理想;与参考值的比较分析主要考察插补结果与参考值(即“vcmsl”校正产品)的一致性,通过比较像元尺度上插补结果与参考值的差异绝对值 D_{abs} ,以及比较平均差异绝对值 AD_{abs} 和灯光辐射值总和 TNL (Total Nighttime Light) 的时间序列进行;算法的性能则主要比较计算时长。

$$D_{\text{abs}}(i) = |DNB_{\text{est}}(i) - DNB_{\text{vcmsl}}(i)|, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$AD_{\text{abs}} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{\text{abs}}(i)}{n} \quad (2)$$

$$TNL = \sum_{i=1}^n DNB_i \quad (3)$$

式中: DNB_{est} 为夜间灯光的模拟辐射值; DNB_{vcmsl} 为“vcmsl”校正产品的辐射值; DNB_i 为第 i 个像元的辐射值; n 为像元的总个数。

1.2.1 三次样条插值

三次样条插值法的核心思想是在每个相邻节点所构成的区间内构造一个不高于三次的多项式(刘建文等, 2018)。逐像元以三次样条法插值灯光序列后,将得到光滑且稳定的插值函数。VIIRS/DNB的时间节点 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 对应的辐射值 $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 其三次样条插值函数 $f(x)$ 满足: ① $f(x_i) = y_i, i = 1, 2, \dots, n$; ② 在任意两个插值节点之间都是不高于三次的多项式; ③ 在样本区间内具有二阶连续导数。

采用三次样条插值法插补2015年5—7月的缺失数据时,使用2014年8月至2015年4月,以及2015年8月至2016年4月前后共计18个月的“vcm”产品作为插补的原始数据。

1.2.2 三次 Hermite 插值

三次 Hermite 插值的插值曲线构造方法与三次样条插值法相同,两者仅在端点处的斜率取值不同。三次 Hermite 插值曲线仅满足一阶可导,二阶不一定可导(严兰兰等, 2017),这一特性使得三次 Hermite 插值曲线具有保形性(Shape Preserving)(Han, 2018),即当原始数据不光滑时, Hermite 不会发生过冲(Overshoot)现象而超出原始数据的数值范围(Fritsch et al, 1980)。换言之,使用 Hermite 插值夜间灯光数据时,可预见其插补结果不会超出原始灯光数据 $[0, 285]$ 的阈值范围,但与此同时,插值曲线不如三次样条插值曲线光滑。

与三次样条插值法相同,使用三次 Hermite 插值基于像元尺度进行插补实验时,使用同样的时间序列作为原始数据。

1.2.3 灰色预测模型

灰色预测模型通过拟合原始数据的累加序列而达到预测目的(邓聚龙, 1986)。VIIRS/DNB 可用于插补的时间序列较短,又呈非负、等距离观测,恰好与该方法适用于小样本、非负、等距观测的使用条件契合(刘思峰等, 2015),故将该算法作为实验方

法之一。与此同时,本文采用后验差法进行检验,当原始序列和残差序列 E 的方差分别为 S_1 、 S_2 时,后验差比为 $c=S_1/S_2$,小差异概率为 $P=P\{|E(i)-\bar{E}|<0.6745S_0\}$,当 c 和 P 同时满足 $c<0.35$ 、 $P>0.95$ 时,预测精度等级为好。本文仅保留预测精度等级为好的预测结果,其余结果赋值为0。

使用灰色预测法时,先采用2014年8月—2015年4月共9个月的原始数据正向插补,再使用2015年8月至2016年4月的原始数据逆向插补(宋中民等, 2001),最终取两者平均值为最终插补值。

1.2.4 指数平滑法

指数平滑法获得的预测值是原始序列的加权,且距离预测时间越近,权重越大。VIIRS/DNB的月度数据时间序列呈非平稳的季节波动变化过程(Levin, 2017)。因此,从算法原理上,应用于拟合周期波动变化的三次指数平滑法更适合于VIIRS/DNB夜间灯光时序的插补。

三次指数平滑法的计算过程中,原始数据的权重由一个(0, 1)之间的平滑系数 α 决定,平滑系数 α 的选择依据是使拟合数据的误差平方和SSE(Sum of the Squared for Error)最小(Hyndman et al, 2014)。为了缩减计算次数,本文将(0, 1)区间分割为10等分的子区间,再分别在每个子区间内采用黄金分割法(赵志伟等, 2016)收敛出子区间内的 α ,对比各个子区间内的SSE而得到最佳 α 。另外,由于原始数据序列长度较短,所以每个像元的时间序列均采用前3个时序样本的平均值作为预测的初始值。另外,与灰色预测模型方法相似,三次指数平滑法也是采用正向插补和逆向插补的平均值作为最终插补值。

2 结果与分析

2.1 插补结果异常值对比

表1显示了4种算法插补结果的异常值统计情

况。4种算法均未出现大量异常值,异常值的像元个数占比均低于2%,其中三次Hermite插值算法的插值结果因不会过冲而没有出现异常值;三次样条插值法和三次指数平滑法超出阈值的像元总数较多(712~1451个),但是超出程度较小;灰色预测模型超出数量少(14~16个),但是超出程度较大。三次样条插值法出现异常值的原因在于当原始时序辐射值临近阈值时,在缺少约束条件的情况下,其二阶可导性容易导致插值曲线发生过冲(戴豪民等, 2015),使结果振荡出[0, 285]的阈值范围;灰色预测模型的预测精度主要取决于原始序列的光滑度(甘祥前等, 2018),当原始序列不够平滑时,可能会导致预测精度下降。三次指数平滑法与灰色预测模型相似,其对突变数据的跟踪能力较强,因此变化不稳定的原始序列也会引起预测曲线出现较大的振荡(张嘉望等, 2015),从而出现异常值。从图2至图4可见,三种算法结果超出 $285\text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 的异常值均分布于首都机场,低于0的异常值均零散分布于建成区边缘,这是因为这些区域首先辐射量值临近阈值;其次,这些区域的像元时序标准差平均值($6.39\text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)远大于整个研究区($2.03\text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$),即这些区域的像元时序不够平稳,因此异常值易在这些区域出现。

尽管插补结果出现异常值,但由于产生的异常值数量相较于全实验区99972个像元而言都较少,且多分布于建成区边缘和首都机场附近,基本不影响人类主要活动区建成区内的插补,因此初步认为4种算法的插补结果较为稳定,可用于社会经济活动研究时VIIRS/DNB夜间灯光数据的时序插补。

2.2 与参照数据比较

2.2.1 差异绝对值分级比较

差异绝对值 D_{abs} 的分级统计结果如表2所示。整体而言,三次Hermite插值法的 D_{abs} 最小,灰色预测模型的 D_{abs} 最大。4种算法的 D_{abs} 大多低于 $10\text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$,且皆以[0, 2)区间占比最多(接近或超过

表1 插补结果异常值分布
Tab.1 Distribution of interpolation anomaly (nWcm⁻²sr⁻¹)

插补方法	5月		6月		7月	
	<0	>285	<0	>285	<0	>285
	均值(个数)	均值(个数)	均值(个数)	均值(个数)	均值(个数)	均值(个数)
三次样条插值	-0.15 (899)	312.11 (6)	-0.20 (1341)	315.51 (3)	-0.21 (819)	301.88 (2)
三次Hermite插值	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
灰色预测模型	-9.04 (16)	0 (0)	-10.88 (16)	0 (0)	-14.71 (14)	0 (0)
三次指数平滑	-0.08 (710)	297.36 (2)	-0.11 (850)	290.64 (2)	-0.10 (1447)	297.76 (4)

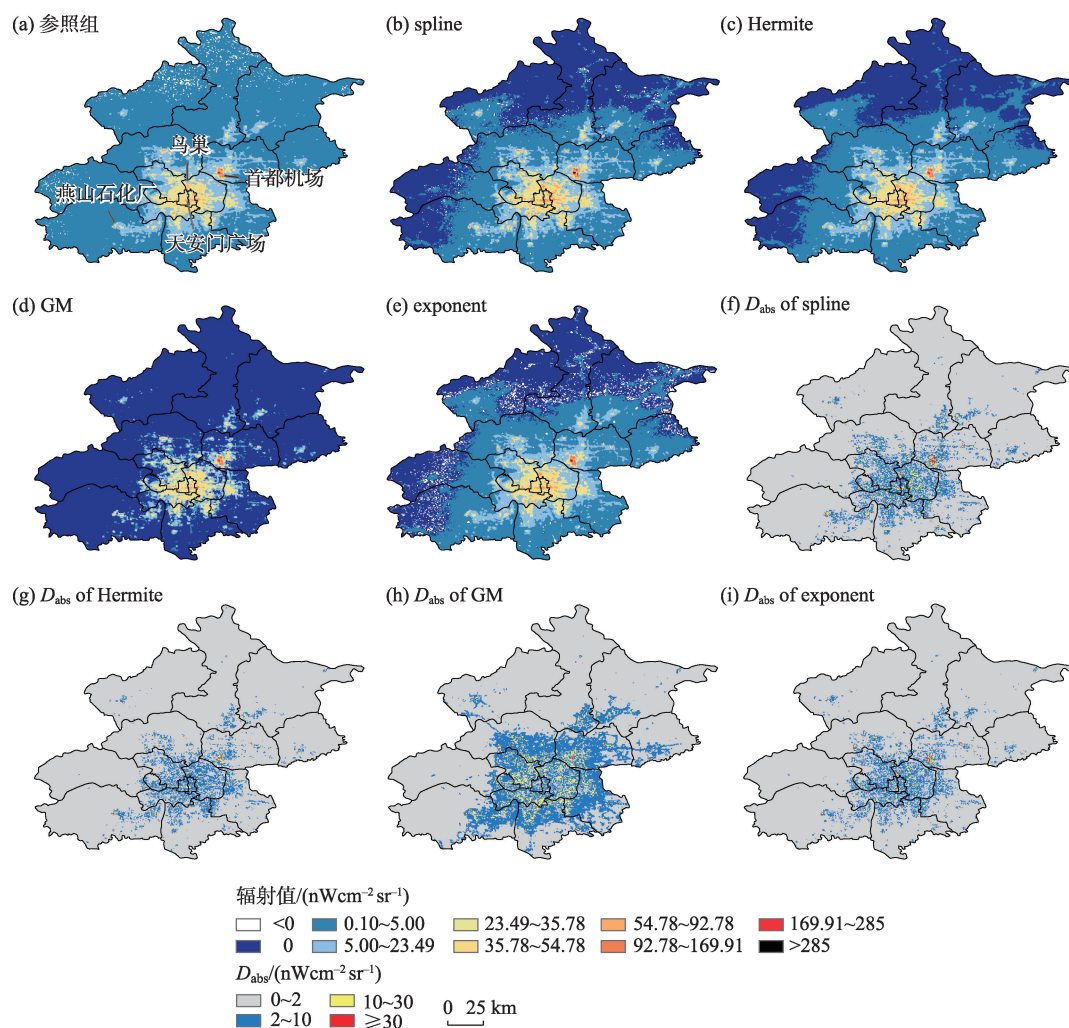


图2 5月份插补结果对比图:(a)为5月份“vcmsl”参照值;(b)与(f)分别为三次样条插值(spline)方法的插补结果及其 D_{abs} 分级;(c)与(g)分别为三次 Hermite 插值(Hermite)的插补结果及其 D_{abs} 分级;(d)与(h)分别为灰色预测模型(GM)的插补结果及其 D_{abs} 分级;(e)与(i)分别为三次指数平滑(exponent)方法的插补结果及其 D_{abs} 分级

Fig.2 Interpolation results of May: (a) is Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Cloud Mask Stray Light (vcmsl) of May; (b) and (f) are cubic spline interpolation (spline) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (c) and (g) are cubic Hermite interpolation (Hermite) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (d) and (h) are gray model's (GM) interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (e) and (i) are triple exponential smoothing (exponent) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively

70%), $\geq 30 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 区间占比最少(几乎不超过3%)。

图2至图4分别显示了5—7月份“vcmsl”校正产品、4种算法插补结果及其 D_{abs} 的空间分布。可以看出,除灰色预测拟合结果与参照组差异较为显著外,另外3种方法的插补结果与参照组无明显差异。5月份 D_{abs} 的空间分布显示,建成区内,除了灰色预测模型的 D_{abs} 以[10, 30]区间分布较多外(图2h),其他3种算法的 D_{abs} 均以[2, 10]区间分布为主(图2f、图2g、图2i),且三次 Hermite 插值法的 D_{abs} 分布范围最小(图2g),即该方法的插补结果与“vcmsl”

校正产品最为接近。另外,4种算法均在首都机场、鸟巢附近、长安大街一带出现较大的 D_{abs} ,这些区域的原始数据标准差较大,说明原始时序的不稳定变化容易影响插补结果,导致插补结果与参照值出现较大偏差。

6月份的插补结果与5月份总体格局相似,仅在燕山石化生产厂附近两者差异较大。6月燕山石化生产厂附近的“vcmsl”校正产品的辐射量值在 $317\sim 8340 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 之间(图3a),其值远远大于阈值 $285 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$,且该区域于其他月份几乎未出现

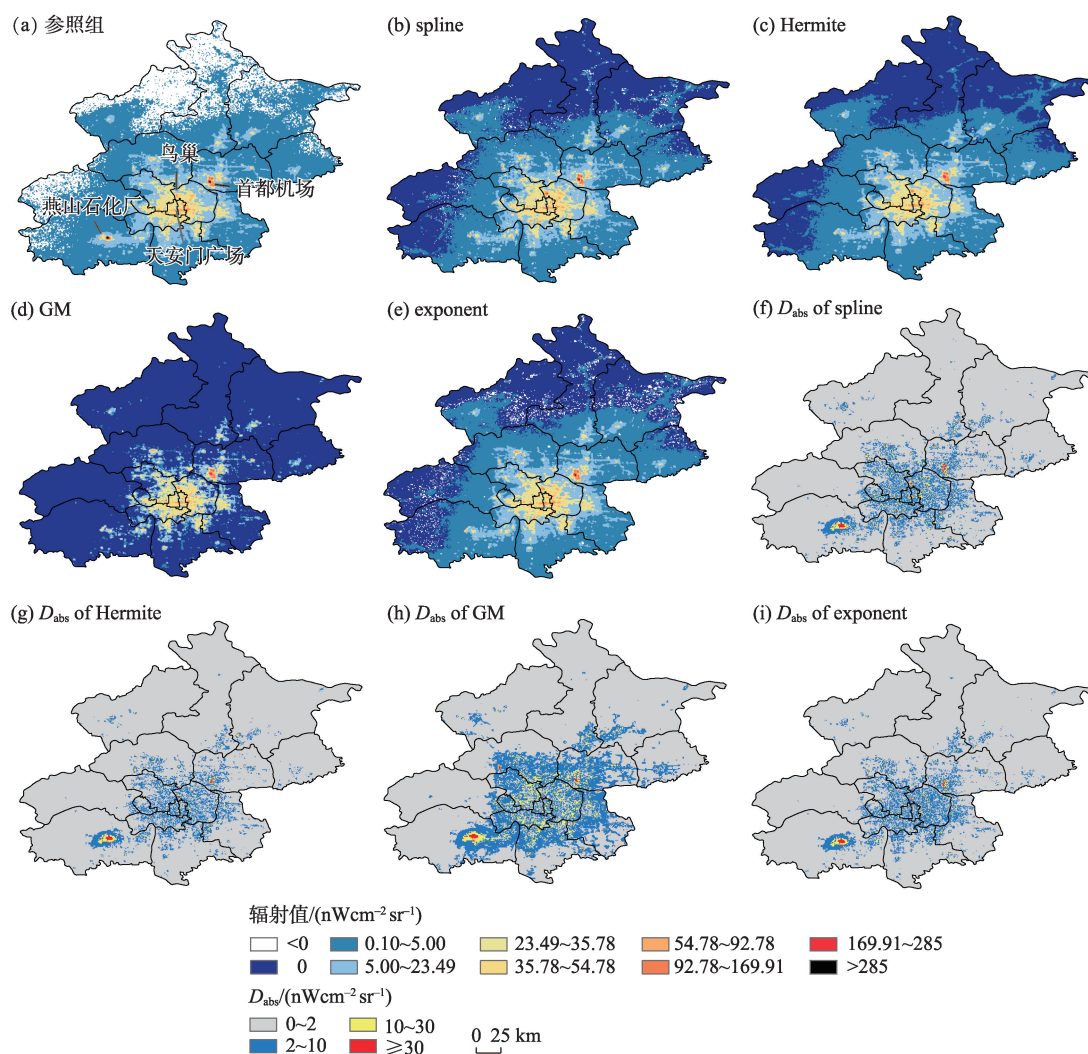


图3 6月份插补结果对比图:(a)为6月份“vcmsl”参照值;(b)与(f)分别为三次样条插值(spline)方法的插补结果及其 D_{abs} 分级;(c)与(g)分别为三次Hermite插值(Hermite)的插补结果及其 D_{abs} 分级;(d)与(h)分别为灰色预测模型(GM)的插补结果及其 D_{abs} 分级;(e)与(i)分别为三次指数平滑(exponent)方法的插补结果及其 D_{abs} 分级

Fig.3 Interpolation results of June: (a) is Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Cloud Mask Stray Light (vcmsl) of June; (b) and (f) are cubic spline interpolation (spline) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (c) and (g) are cubic Hermite interpolation (Hermite) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (d) and (h) are gray model's (GM) interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (e) and (i) are triple exponential smoothing (exponent) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively

极大异常值(图5),因此认为参照数据在该区域出现突变异常值的原因可能在于火光。经对VIIRS燃烧源识别产品的逐日排查发现,该区域分别于6月2日、19日出现温度超过1600 K的点源,由此佐证了火光影响的猜想,因此不难理解6月该区域出现较大的 D_{abs} 偏差。“vcmsl”校正产品所保留的非稳定性光源应用于社会经济活动研究时应该被去掉(Li et al, 2013),而本文所评价的4种算法都能有效平滑火光等极大辐射值,由此进一步体现了4种算法运

用于社会经济活动研究时的适宜性。

7月份4种算法插补结果的偏差都远大于5、6月,由东城、西城、朝阳、海淀、石景山、丰台组成的六城区的 D_{abs} 上升至[10, 30)区间(图4f-4i)。出现较大差异的原因主要在于7月份参照数据“vcmsl”校正产品的辐射值整体偏小(图4a)。与5、6月相比,7月份的“vcmsl”校正产品量值整体偏小,空间对比度明显减弱,甚至出现城市纹理刻画不清晰的缺点,反观4种插补方法的插补结果,都比7月份的

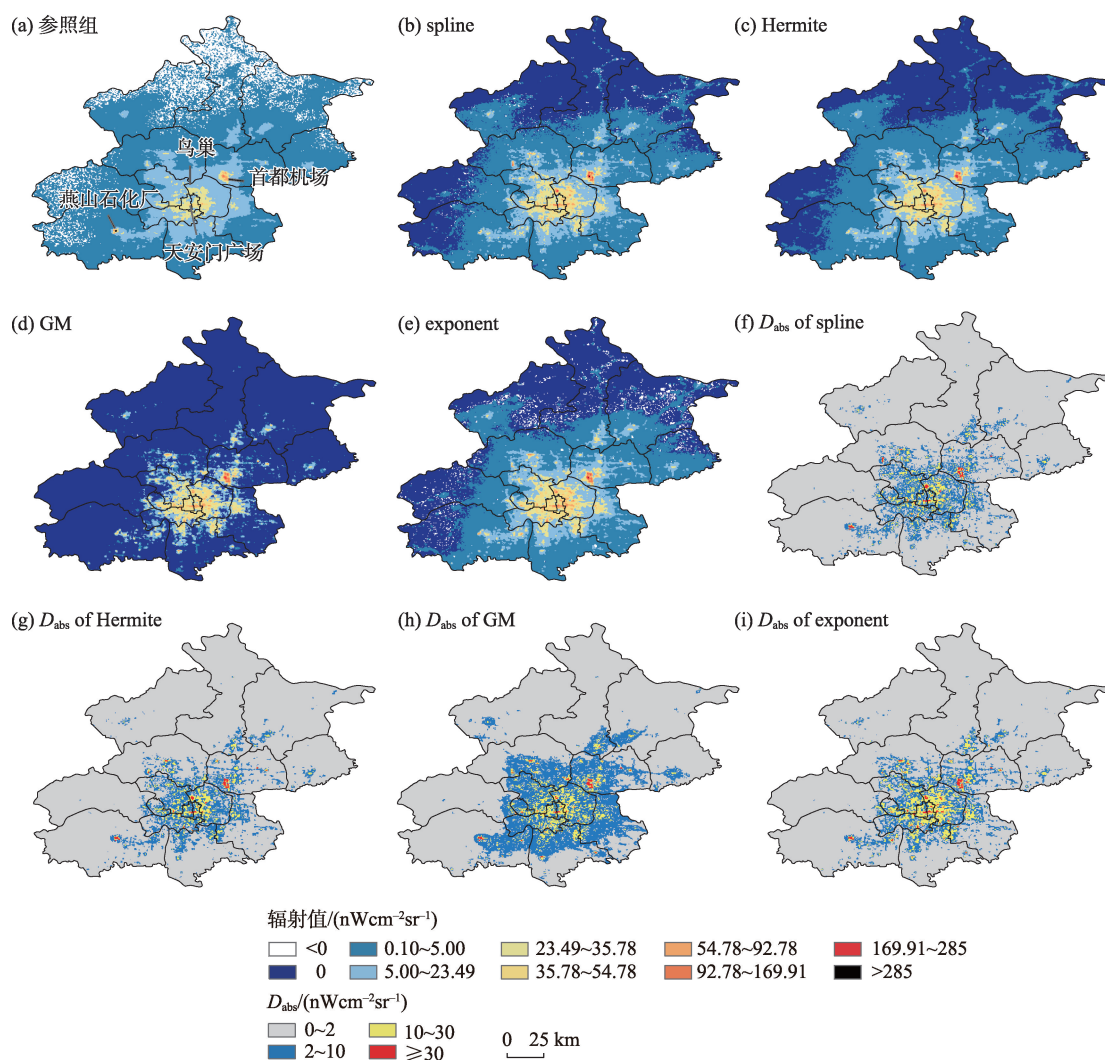


图4 7月份插补结果对比图:(a)为7月份“vcmsl”参照值;(b)与(f)分别为三次样条插值(spline)方法的插补结果及其 D_{abs} 分级;(c)与(g)分别为三次 Hermite 插值(Hermite)的插补结果及其 D_{abs} 分级;(d)与(h)分别为灰色预测模型(GM)的插补结果及其 D_{abs} 分级;(e)与(i)分别为三次指数平滑(exponent)方法的插补结果及其 D_{abs} 分级

Fig.4 Interpolation results of July: (a) is Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Cloud Mask Stray Light (vcmsl) of July; (b) and (f) are cubic spline interpolation (spline) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (c) and (g) are cubic Hermite interpolation (Hermite) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (d) and (h) are gray model's (GM) interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively; (e) and (i) are triple exponential smoothing (exponent) method's interpolation result and distribution of D_{abs} , respectively

“vcmsl”校正产品更能反映出城市的结构。

2.2.2 平均差异绝对值与灯光辐射值总和对比

模型对原始序列的拟合程度是判断拟合效果好坏的指标之一(Hyndman et al, 2014),因此本文同时考察了整个建模序列内(2014年8月至2016年4月)拟合值与参考值的变化曲线。已有研究表明夜间灯光的灯光辐射值总和 TNL 能够综合反映人类的社会经济活动(Ma et al, 2014),因此本文选取 TNL 及平均差异绝对值 AD_{abs} 两项指标,判断各算法的拟合情况。但依据插值算法的原理,三次样条插

值和三次 Hermite 插值曲线在样本点处的预测值即为原始值,即非预测时段内(5—7月以外月份) TNL 必然与原始数据相等, AD_{abs} 为0,因此,对于这两种方法,仅计算其5—7月的 TNL 与 AD_{abs} 。

如图6所示, TNL 方面,除了灰色预测模型因插补过程中未通过检验的像元被赋予0值而导致其 TNL 序列整体偏小外,其他3种算法均与参照组相差不大。非插补月份内,三次指数平滑法的 TNL 与参照数据非常接近,进一步说明其拟合结果较好;插补月份内,除灰色预测模型外的3种算法5、6月

表2 差异绝对值分布范围分段统计
Tab.2 Classification of absolute difference value

预测 月份	D_{abs} 分级/ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)	三次样条插值		三次 Hermite 插值		灰色预测模型		三次指数平滑	
		比例/%	平均值/ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)	比例/%	平均值/ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)	比例/%	平均值/ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)	比例/%	平均值/ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)
5月	0~2	88.55	0.28	91.40	0.24	74.78	0.45	90.65	0.27
	2~10	10.04	4.41	8.05	4.09	22.18	4.49	8.66	4.09
	10~30	1.30	14.54	0.52	14.56	2.99	13.86	0.62	14.28
	≥ 30	0.11	46.19	0.03	41.03	0.05	42.37	0.07	51.18
	$AD_{abs}/$ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)		0.93		0.64		1.77		0.72
6月	0~2	87.55	0.27	90.86	0.26	75.84	0.39	89.21	0.26
	2~10	10.94	4.34	8.42	4.01	20.89	4.49	9.83	4.21
	10~30	1.34	14.87	0.62	15.08	3.12	14.09	0.85	14.50
	≥ 30	0.17	209.37	0.10	314.35	0.15	228.50	0.11	293.43
	$AD_{abs}/$ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)		1.26		0.98		2.01		1.09
7月	0~2	86.05	0.26	86.93	0.24	73.92	0.39	84.45	0.24
	2~10	11.13	4.76	10.52	4.88	21.69	4.68	10.59	4.98
	10~30	2.59	14.94	2.35	14.48	4.13	14.41	4.60	15.58
	≥ 30	0.24	83.30	0.20	82.59	0.26	67.36	0.36	63.70
	$AD_{abs}/$ ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)		1.34		1.23		2.08		1.68

的 TNL 与参照值数值相近,7月则由于“vcmsl”校正产品 TNL 偏小而与之偏差较大。在 AD_{abs} 比较方面,插补月份内三次样条插值法、三次 Hermite 插值法、三次指数平滑法 3 种算法的 AD_{abs} 都较为相近;插补月份之外,三次指数平滑法的 AD_{abs} 基本保持在较低的水平,说明其拟合结果与原始序列(“vcm”产品)非常接近,而灰色预测模型的 AD_{abs} 始终处于相对较高的水平,再次表明灰色预测模型的插补效果不如另外 3 种方法。

2.3 算法性能比较

4 种插补算法都兼具计算方法简单且容易编程的特点,但在计算时长上,却有较大的差异。三次指数平滑方法相对较慢,插补北京市 99972 个像元耗时约 1393 s,另外 3 种算法的计算速度都较快,计算时长不足 10 s(表 3)。三次指数平滑方法计算缓慢的原因在于该方法需要多次重复进行收敛计算以确定最佳平滑系数 α 。虽然本文所采用的黄金分割法能有效减少收敛次数,但对于每个像元仍至少需要重复计算 10 次才能获得最佳 α 。换言之,对于同等面积的区域,三次指数平滑法的计算量至少是另外 3 种算法的 10 倍,因此,三次指数平滑法耗时明显长于另外 3 种方法。

3 讨论与结论

3.1 讨论

由于 VIIRS/DNB 夜间灯光数据的多方面优点,使其广泛应用于各项社会经济专题研究,但不可避免的是,该数据容易受到杂散光的污染,虽然 NO-AA 提供了“vcmsl”杂散光校正产品,但是其一,该产品缺少 2012 年及 2013 年的数据,致使中高纬度地区的 VIIRS/DNB 夜间灯光数据存在数据空白;其二,该产品的精度有待提高,如部分地区的数据出现量值整体偏小的情况(图 4a),因此,探索插补缺省值的新方法对推进 VIIRS/DNB 夜间灯光数据的应用具有重要的研究意义。

本文基于时序数据的插补原理,采用了 4 种插补方法。这 4 种插补方法中,三次样条插值和三次 Hermite 插值立足于多项式的构造,灰色预测模型立足于原始数据的累加序列拟合,三次指数平滑法立足于原始数据的权重累加。由此可见,虽然这 4 种算法所基于的计算思想不同,但是都不要求原始数据符合统计分布。此外,不像神经网络时间预测法需要人为主观参与训练(张晓瑞等, 2013),或是 ARIMA 模型需要人为识别时序自相关和偏相关的

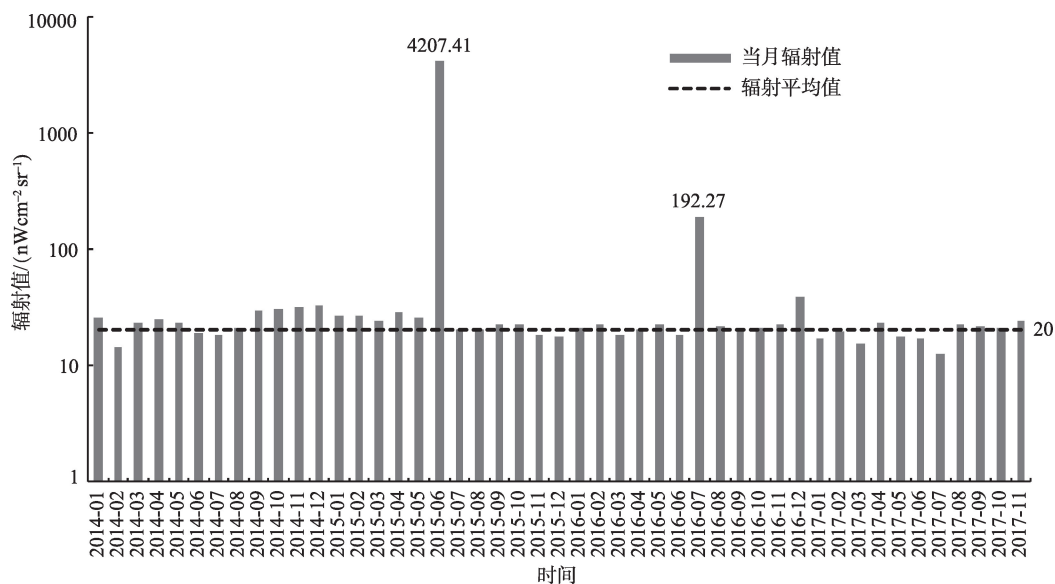
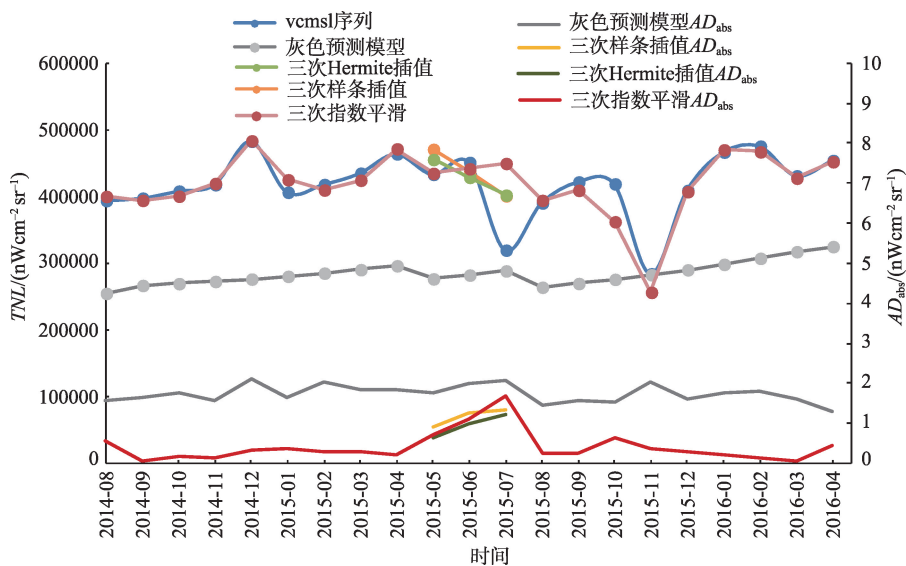


图5 燕山石化生产厂附近辐射平均值的时间序列(对数坐标)

Fig.5 Time series of radiation average surrounding the Yanshan Petrochemical Production Plant (logarithmic scale)

图6 2014年8月至2016年4月TNL与 AD_{abc} 的时间序列变化曲线Fig.6 Time series of day/night band (DNB) summation and AD_{abc} from August 2014 to April 2016

拖尾与截尾状况(赵杰等, 2015),这4种算法的计算过程都不需要人为主观干预,因此从该角度讲,这4种插补方法都适合于像元数量庞大、时间序列较短的VIIRS/DNB夜间灯光时序插补,插补结果也都较为理想(表1)。除此之外,这4种算法都是基于原始序列的平均状态开展计算,一定程度上保证插补后的整个灯光时序趋于平稳,避免“vcmsl”校正数据于某个月份出现整体偏小的情况,使之更符合大部分夜间灯光呈缓慢变化的事实。与此同时,这4种算法在插补的过程中都能有效平滑掉火光等极大

异常值,令其更有效地应用于社会经济活动研究。

尽管如此,4种方法的优缺点也较为明显:首先,算法对原始数据的要求不同。三次指数平滑法和灰色预测模型仅要求插补月份单侧有连续可用的时序数据。三次样条插值法和三次Hermite插值法则不仅要求插补月份前后两侧都有数值,且对双侧数据的时序长度也有要求。其次,算法的适用性不同,三次样条插值法和三次Hermite插值法属于插值方法,仅适用于插补中间缺失值,不可用于时间预测。灰色预测模型和三次指数平滑法都可用

表3 3种插补方法对比
Tab.3 Comparison of the four interpolation methods

	三次样条插值	三次 Hermite插值	灰色预测模型	三次指数平滑
算法思想	多项式构造	多项式构造	一次累加序列拟合	原始值的权重累加
算法适用性	仅能插补中间缺失值	仅能插补中间缺失值	能插补、能预测	能插补、能预测
计算复杂度	简单	简单	简单	简单,但重复
插补精度	较高	较高	较低	较高
计算总时长/s	9.756	9.623	9.952	1392.927
平均时长/s	1.331E-04	1.313E-04	1.356E-04	1.900E-02
算法优点	① 不要求数据符合特定分布 ② 插值综合前后数据 ③ 运行速度快 ④ 插补精度高	① 不要求数据符合特定分布 ② 插值综合前后数据 ③ 运行速度快 ④ 插补精度高 ⑤ 不会出现异常值	① 不要求数据符合特定分布 ② 所需时序短,只需单侧有价值 ③ 运行速度快 ④ 可用于预测	① 不要求数据符合特定分布,适用于周期波动非线性序列 ② 所需时序短,只需单侧有价值 ③ 可用于预测 ④ 插补精度高
算法缺点	① 数据长度要求高,且要求两侧均有值 ② 容易受异常值影响 ③ 不可用于预测	① 数据长度要求高,且要求两侧均有值 ② 容易受异常值影响 ③ 不可用于预测	① 不可直接用于非负时间序列预测 ② 插补有效值空间范围小	① 运行速度较慢

于中间值插补或时间序列预测。其三,算法插补的效果不同,灰色预测模型的插补效果相对较差,另外3种算法的插补效果较好;最后,算法的计算时长不同,三次指数平滑法因需要多次重复计算平滑系数而耗时明显长于另外3种方法(表3)。

3.2 结论

针对夏季中高纬度地区 VIIRS/DNB 夜间灯光月度产品存在大面积缺失的情况,本文以北京市为实验研究区,2015年5—7月为插补时段,通过异常值分析、与参考值比较分析及计算性能比较分析3个方面,系统评价了三次样条插值法、三次 Hermite 插值法、灰色预测模型、指数平滑法4种常用插补算法的适宜性。对比结果表明:

第一,异常值分析方面,4种算法均未出现大量异常值,异常值的像元个数占比均低于2%,且三次 Hermite 插值算法因不会过冲而没有出现异常值。

第二,与参考值比较分析方面,除灰色预测模型外,另外3种算法85%以上的像元与“vcmsl”校正产品的差异绝对值都在[0, 2)区间内,三次 Hermite 插值算法甚至达到91.40%;另外,4种算法都能有效地消除火光,且不会出现“vcmsl”校正产品中整体量值偏小的问题。

第三,计算性能对比方面,4种算法都具备容易计算、不需要人为主观干涉的优点。计算时长上,除了三次指数平滑方法需要重复计算而较缓慢外,另外3种方法计算速度都较快,插补单个像元耗时不超0.000 15 s。

综上所述,4种算法都能有效插补因杂散光污染而失真的像元数值。结合算法的优缺点,本文认为当所需插补月份前后两侧有足够长的时序数据时(如插补2013年5—7月的灯光序列),适宜使用插补速度快、效果好、不会出现过冲现象的三次 Hermite 插值法,或是插补速度快、效果好,但会出现少量异常值的三次样条插值法;当所需插补月份仅单侧有足够长的时序数据时,宜使用三次指数平滑法进行拟合运算,如插补2012年5—7月的灯光序列,此时若所需插补的空间范围过大,且对插补精度要求不高的情况下,可使用灰色预测模型代替三次指数平滑法。另外,由于插补时的原始时序以稳定光源为主,因此出现短暂性光源的地方会在插补过程中被平滑掉,使得插补后的结果不体现火光、船只灯光等短暂性光源,是以本文的结果主要适用于反映社会经济因素的稳定性光源研究,而不适用于特定主题下的短暂性光源研究。

参考文献(References)

陈青燕, 梁丹, 徐文兵, 等. 2016. 一种线目标豪斯多夫相似距离度量指标 [J]. 测绘科学, 41(8): 14-18. [Chen Q Y, Liang D, Xu W B, et al. 2016. Study of the linear object similarity measure based on Hausdorff distance. Science of Surveying and Mapping, 41(8): 14-18.]

戴豪民, 许爱强. 2015. 基于张力格林样条的EMD均值曲线插值方法 [J]. 计算机工程与设计, 36(2): 401-405. [Dai H M, Xu A X. 2015. Interpolation approach of mean curve for EMD based on Green's spline in tension. Computer En-

- gineering and Design, 36(2): 401-405.]
- 邓聚龙. 1982. 灰色控制系统 [J]. 华中工学院学报, (3): 9-18. [Deng J L. 1982. The gray control system. Journal of Huazhong University of Science and Technology, (3): 9-18.]
- 邓聚龙. 1986. 本征性灰色系统的主要方法 [J]. 系统工程理论与实践, (1): 60-65. [Deng J L. 1986. The main methods of intrinsic gray system. Systems Engineering—Theory & Practice, (1): 60-65.]
- 段功豪, 牛瑞卿, 赵艳南, 等. 2016. 基于动态指数平滑模型的降雨诱发型滑坡预测 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 41(7): 958-962. [Duan G H, Niu R Q, Zhao Y N, et al. 2016. Rainfall-induced landslide prediction based on dynamic exponential smoothing model. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 41(7): 958-962.]
- 甘祥前, 任超, 刘林波. 2018. 基于小波去噪的非等间距多点灰色预测模型 [J]. 测绘地理信息, 43(3): 41-44. [Gan X Q, Ren C, Liu L B. 2018. Non-equidistant multi-point gray prediction model based on wavelet danoising. Journal of Geomatics, 43(3): 41-44.]
- 顾朝林, 张悦, 翟炜, 等. 2016. 城市与区域定量研究进展 [J]. 地理科学进展, 35(12): 1433-1446. [Gu C L, Zhang Y, Zhai W, et al. 2016. Progress in urban and regional quantitative research. Progress in Geography, 35(12): 1433-1446.]
- 李峰, 孙广通, 王秋玲, 等. 2018. NPP-VIIRS夜间灯光数据的县级电力消费空间化研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 41(4): 8-11. [Li F, Sun G T, Wang Q L, et al. 2018. Spatialization research of electricity consumptions at county level using NPP-VIIRS nighttime lights. Geomatics & Spatial Information Technology, 41(4): 8-11.]
- 李翔, 陈振杰, 吴洁璇, 等. 2017. 基于夜间灯光数据和空间回归模型的城市常住人口格网化方法研究 [J]. 地球信息科学学报, 19(10): 1298-1305. [Li X, Chen Z J, Wu J X, et al. 2017. Gridding methods of city permanent population based on night light data and spatial regression models. Journal of Geo-information Science, 19(10): 1298-1305.]
- 李欣欣, 何飞, 王利. 2018. 大连金普新区城镇空间拓展特征研究 [J]. 地理空间信息, (1): 27-31. [Li X X, He F, Wang L. 2018. Study on urban spatial expansion characteristics of Jinpu new district in Dalian. Geospatial Information, (1): 27-31.]
- 刘建文, 周玉科. 2018. 站点尺度的青藏高原时序NDVI重构方法比较与应用 [J]. 地理科学进展, 37(3): 427-437. [Liu J W, Zhou Y K. 2018. Comparison and application of NDVI time-series reconstruction methods at site scale on the Tibetan Plateau. Progress in Geography, 37(3): 427-437.]
- 刘敬强, 瓦哈甫·哈力克, 哈斯穆·阿比孜, 等. 2013. 新疆特色林果业种植对气候变化的响应 [J]. 地理学报, 68(5): 708-720. [Liu J Q, Wahap H L K, Hasim A B Z, et al. 2013. Responses of characteristic horticulture plant to climate change of Xinjiang. Acta Geographica Sinica, 68(5): 708-720.]
- 刘思峰, 杨英杰. 2015. 灰色系统研究进展(2004-2014) [J]. 南京航空航天大学学报, 47(1): 1-18. [Liu S F, Yang Y J. 2015. Advances in grey system research (2004-2014). Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 47(1): 1-18.]
- 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 2018. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略 [J]. 地理学报, 73(4): 701-710. [Peng J, Li H L, Liu Y X, et al. 2018. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an new area. Acta Geographica Sinica, 73(4): 701-710.]
- 沈海迪, 万振凯. 2017. 基于指数平滑法的动态预测机制 [J]. 计算机技术与发展, 27(7): 6-9. [Shen H D, Wan Z K. 2017. A dynamic prediction mechanism based on exponential smoothing method. Computer Technology and Development, 27(7): 6-9.]
- 宋中民, 邓聚龙. 2001. 反向累加生成及灰色GOM(1,1)模型 [J]. 系统工程, (1): 66-69. [Song Z M, Deng J L. 2001. The accumulated generating operation in opposite direction and its use in gray model GOM(1,1). Systems Engineering, (1): 66-69.]
- 严兰兰, 韩旭里, 饶智勇. 2017. 具有指定多项式重构精度和连续阶的插值曲线构造方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 29(4): 707-719. [Yan L L, Han X L, Rao Z Y. Construction method of interpolation curve with given polynomial reconstruction precision and continuity order. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 29(4): 707-719.]
- 张嘉望, 郭军献, 李福松. 2015. 基于最优平滑系数三次指数平滑法的转速预测 [J]. 探测与控制学报, 37(5): 43-46. [Zhang J W, Guo J X, Li F S. 2015. Rotation speed prediction based on cubic exponential smoothing method. Journal of Detection & Control, 37(5): 43-46.]
- 张晓瑞, 方创琳, 王振波, 等. 2013. 基于RBF神经网络的城市建成区面积预测研究: 兼与BP神经网络和线性回归对比分析 [J]. 长江流域资源与环境, 22(6): 691-697. [Zhang X R, Fang C L, Wang Z B, et al. 2013. Prediction of urban built-up area based on RBF neural network. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 22(6): 691-697.]
- 赵杰, 花向红, 刘闯, 等. 2015. ARIMA-BP组合模型在高铁沉降预报中的应用研究 [J]. 测绘地理信息, 40(4): 54-56. [Zhao J, Hua X H, Liu C, et al. 2015. Application of ARIMA-BP model in the settlement prediction of high speed railway. Journal of Geomatics, 40(4): 54-56.]

- 赵志伟, 杨景明, 呼子宇, 等. 2016. 基于一次指数平滑法的自适应差分进化算法 [J]. 控制与决策, 31(5): 790-796.
- [Zhao Z W, Yang J M, Hu Z Y, et al. 2016. Self-adaptive differential evolution algorithm based on exponential smoothing. *Control and Decision*, 31(5): 790-796.]
- Bennett M M, Smith L C. 2017. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 192: 176-197.
- Chen X, Nordhaus W. 2015. A test of the new VIIRS lights data set: Population and economic output in Africa [J]. *Remote Sensing*, 7(4): 4937-4947.
- Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M, et al. 2013. Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights [J]. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35: 62-69.
- Fritsch F N, Carlson R E. 1980. Monotone piecewise cubic interpolation [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17(2): 238-246.
- Han X. 2018. Shape-preserving piecewise rational interpolation with higher order continuity [J]. *Applied Mathematics & Computation*, 337: 1-13.
- Hyndman R J, Athanasopoulos G. 2014. *Forecasting: Principles and practice* [M]. Australia: OTexts.
- Lee T E, Miller S D, Turk F J, et al. 2006. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(2): 191-199.
- Levin N. 2017. The impact of seasonal changes on observed nighttime brightness from 2014 to 2015 monthly VIIRS DNB composites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 193: 150-164.
- Li X, Li D, Xu H, et al. 2017. Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS night-time light images to evaluate city light dynamics of Syria's major human settlement during Syrian Civil War [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21): 5934-5951.
- Li X, Xu H, Chen X, et al. 2013. Potential of NPP-VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China [J]. *Remote Sensing*, 5(6): 3057-3081.
- Li X, Zhang R, Huang C, et al. 2015. Detecting 2014 Northern Iraq insurgency using night-time light imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 36(13): 3446-3458.
- Liao L B, Weiss S, Mills S, et al. 2013. Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(22): 12705-12718.
- Ma T, Zhou C, Pei T, et al. 2014. Responses of Suomi-NPP VIIRS-derived nighttime lights to socioeconomic activity in China's cities [J]. *Remote Sensing Letters*, 5(2): 165-174.
- Miller S D, Straka W, Mills S P, et al. 2013. Illuminating the capabilities of the Suomi national polar-orbiting partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/night band [J]. *Remote Sensing*, 5(12): 6717-6766.
- Mills S, Weiss S, Liang C. 2013. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction [C]// *Proc. SPIE 8866, Earth Observing Systems XVIII*. doi: 10.1117/12.2023107.
- Qiu S, Shao X, Cao C Y, et al. 2017. Assessment of straylight correction performance for the VIIRS day/night band using Dome-C and Greenland under lunar illumination [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21): 5880-5898.
- Román M O, Wang Z, Sun Q, et al. 2018. NASA's Black Marble nighttime lights product suite [J]. *Remote Sensing of Environment*, 210: 113-143.
- Shi K, Yu B, Huang Y, et al. 2014. Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: A comparison with DMSP-OLS data [J]. *Remote Sensing*, 6(2): 1705-1724.
- Zhang Q, Wang P, Chen H, et al. 2017. A novel method for urban area extraction from VIIRS DNB and MODIS NDVI data: A case study of Chinese cities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21): 6094-6109.
- Zhao N, Hsu F C, Cao G, et al. 2017. Improving accuracy of economic estimations with VIIRS DNB image products [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21): 5899-5918.

Interpolation methods comparison of VIIRS/DNB nighttime light monthly composites: A case study of Beijing

CHEN Mulin^{1,2}, CAI Hongyan^{2*}

(1. The College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences
and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Comparing with nighttime light data acquired by the Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System (DMSP/OLS), nighttime light data sensed by the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band (VIIRS/DNB) have a higher spatial resolution and finer temporal resolution. VIIRS/DNB nighttime light data also have a substantial number of improvements in terms of accuracy and in-flight calibrations. As a result, VIIRS/DNB nighttime light data become a new research hotspot rapidly. Even so, VIIRS/DNB nighttime light data are vulnerable to stray light and contain a large number of distorted values in mid and high latitudes, especially in summer. Therefore, this study took Beijing as an example and adopted cubic spline interpolation (spline), cubic Hermite interpolation (Hermite), gray model (GM), and triple exponential smoothing (exponent) to interpolate default data of May to July 2015, and then compared the results of these four interpolation algorithms. The result shows that: 1) With regard to abnormal values, Hermite does not produce any abnormal value, while the other three algorithms generate few such values (0.02%~1.34%). 2) Comparing with the reference data—the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Cloud Mask Stray Light (VCMSL) version, the interpolation result of Hermite is closest to the reference, and the GM result is least close to the reference. 3) In terms of computing time, all of these four algorithms are easy to be programmed and calculated, but the exponential smoothing method has to calculate smoothing parameter repeatedly and therefore it will spend much more time than the other three algorithms. In conclusion, a comprehensive assessment shows that when the two time periods before and after the interpolation months both have enough original data, Hermite will be the best choice because of its great interpolation performance, no overshoots, and fast calculation speed. Spline takes the second place. When only one side of the interpolation months has adequate data, GM and exponent methods both can be used. The GM calculation runs fast but the interpolation result is not optimal, and exponent calculation runs slow but the algorithm interpolates well.

Keywords: VIIRS/DNB nighttime light data; cubic spline interpolation; cubic Hermite interpolation; gray model; triple exponential smoothing method