



顾及邻近关系的NPP/VIIRS序列影像时空插值方法

程钢, 李岩林, 赵宗泽, 杨杰, 卢小平, 原东方

引用本文:

程钢, 李岩林, 赵宗泽, 杨杰, 卢小平, 原东方. 顾及邻近关系的NPP/VIIRS序列影像时空插值方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(2): 252–260.

CHENG Gang, LI Yanlin, ZHAO Zongze, YANG Jie, LU Xiaoping, YUAN Dongfang. Spatiotemporal Interpolation Method of NPP/VIIRS Sequence Images Considering Neighbor Relationships[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 252–260.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

一种基于常梯度模板插值的声线跟踪算法

A Sound Ray Tracking Algorithm Based on Template–Interpolation of Constant–Gradient Sound Velocity

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 71–78 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180405>

珞珈一号夜间灯光影像在建设用地提取中的应用:以武汉市为例

Extracting Built-up Areas Using Luojia-1A Nighttime Light Imageries in Wuhan, China

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 30–39 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190376>

顾及各向异性加权力矩与绝对相位方向的异源影像匹配

Heterologous Images Matching Considering Anisotropic Weighted Moment and Absolute Phase Orientation

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1727–1736 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200702>

不确定性约束下的AOD空间覆盖STRE建模优化

An Aerosol Optical Depth Spatial Coverage Improvement Method Based on Spatial–Temporal Random Effects with Uncertainty Constraint

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 534–541 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180271>

利用动态上采样滤波深度网络进行多角度遥感影像超分辨率重建

Multi-angle Remote Sensing Images Super-Resolution Reconstruction Using Dynamic Upsampling Filter Deep Network

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1716–1726 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200651>



顾及邻近关系的NPP/VIIRS序列影像时空插值方法

程 钢^{1,2} 李岩林³ 赵宗泽¹ 杨 杰¹ 卢小平^{1,2} 原东方¹

1 河南理工大学测绘与国土信息工程学院,河南 焦作,454000

2 河南理工大学自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室,河南 焦作,454000

3 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:针对可见红外成像辐射仪(visible infrared imaging radiometer suite, VIIRS)月度夜光遥感影像的数据缺失问题,提出一种利用地物邻近关系相关性的像元时空插值方法,以时、空关系互相作为约束条件,将时序变化一致性较好的像元数据作为空间插值的参考,将空间关系一致性较好的月度数据作为时序插值的参考,通过构建不同的卷积核,在时序和空间维度分别对初步插值结果进行卷积运算,求得待插值像元的时空插值。以2015年江苏省月度夜光遥感影像修复为例,对不同维度时空插值方法进行对比分析,结果表明,空间维度插值虽然顾及到像元的空间关联性,仍无法满足数据大范围缺失的插值要求,插值结果整体偏低;时间维度插值考虑到像元的时间趋势性,插值精度较空间维度插值有一定提高,但部分月份插值结果有较大偏差;相对于三次 Hermit 插值,时空插值方法获得的月度影像灯光亮度总和的最大相对误差、年度影像灯光亮度总和相对误差以及逐像元差值均显著降低。总的来看,所提时空插值方法在插值过程中同时顾及到 VIIRS 数据的时间趋势平稳性和空间结构稳定性,影像插值精度提高明显,且对待插值月份前后时序数据没有严格要求,更具有广泛性。

关键词:夜光遥感;VIIRS;卷积运算;时空插值;影像修复;邻近关系

中图分类号:P237

文献标志码:A

已有研究表明,夜光遥感卫星可以探测到夜间城市、车流等产生的不同强度的灯光^[1],夜光遥感数据作为表征人类活动的有效数据指标^[2],已经被广泛应用于社会经济活动研究中^[3-8]。2011年10月美国国家极轨卫星(Suomi National Polar Orbiting Partnership, Suomi-NPP)发射成功, Suomi-NPP 卫星携带了可见红外成像辐射仪(visible infrared imaging radiometer suite, VIIRS),该传感器采用广角探测器,具有更低的辐射检测限和更宽的动态范围,夜光遥感数据的时间和空间分辨率得到大幅提升^[9]。但是, NPP/VIIRS 数据也存在一定问题,受到杂光的影响,月度影像部分数据出现失真,全球有许多地区无法获得当月的高质量数据,这种现象在夏季的中高纬地区表现明显^[10]。美国大气海洋局提供的无云观测

月度影像包括去除杂散光(VIIRS cloud mask, VCM)和包含杂散光校正(VIIRS cloud mask stray light, VCMSL)两种类型,在 VCM 影像中,高纬度部分地区出现数据缺失;VCMSL 影像则是根据文献[11]提出的矫正算法,对受杂光污染的数据进行矫正,保留了更多地区的数据,但数据质量仍有待提升^[12]。质量不佳或者数据缺失问题降低了 NPP/VIIRS 时空数据的准确性和完整性,进而可能导致人们在使用该数据过程中得出不合理的推断,成为 NPP/VIIRS 月度影像数据推广应用的限制条件之一^[13]。探究有效的数据处理方法,获得高质量时空连续的 NPP/VIIRS 月度影像数据成为夜光遥感研究的必要工作。

对于数据缺失问题,地理学研究中通常采用插值的方式对未知数据进行估计,主要包括空间

收稿日期:2021-06-17

项目资助:国家重点研发计划(2016YFC08033103);国家自然科学基金(41001226);中国博士后科学基金面上资助(2015M582831);河南省高校基本科研业务费项目(NSFRF180329)。

第一作者:程钢,博士,教授,主要从事地理空间信息服务与处理研究。chenggang1218@163.com

通讯作者:赵宗泽,博士,讲师。zhaozongze@hpu.edu.cn

插值、时序插值以及时空插值。空间插值根据有限已知点的数值,通过距离或者其他空间关系,推测出空间上未知数据的近似值,常见方法有双线性插值、反距离加权插值以及克里金插值^[14-16]等,主要应用于影像数据重采样等。时序插值则是根据不同时期数据的时序关系,对未知数据进行估计,常见方法有最邻近插值、样条插值、Hermite 插值^[17]等,主要应用于空间上存在大面积缺失数据的插值。时空插值是根据时空数据的平稳性进行缺失数据的估计^[18],常用方法有约减法、扩展法^[19-20]、灰色预测模型等,约减法是从待插值数据前后各选出一个真值对待插值数据进行估算,而扩展法中时空单位的不确定性会导致插值结果存在较大的差异性和不稳定性,上述时空插值方法均无法满足夜光遥感影像插值要求。已有研究对存在数据缺失的 VCM 影像插补主要采用时序插值方法。文献[21]采用一次指数平滑方法对 NPP/VIIRS 月度影像进行了修补,结果表明,修补后数据合成的年度灯光数据在国家、州等不同尺度层面与国内生产总值(gross domestic product, GDP)拟合度均有提高。文献[13]指出一次指数平滑方法对 NPP/VIIRS 月度影像数据插补存在的问题,并系统比较了使用三次样条插值、三次 Hermite 插值、灰色预测模型、三次指数平滑法进行月度数据插补的适用性,结果表明,当被插补月份前后有足够长的时序数据时,三次 Hermite 插值结果最佳。

针对现有夜光遥感数据插值方法忽略时空邻近像元关系,仅从时序维度进行插值的局限性,考虑到城市空间结构的相对稳定性和相同地物时序夜光的相对平稳性,本文利用时空相邻像元的夜光表征数据间的相对稳定关系,提出一种顾及时空邻近关系的 NPP/VIIRS 序列影像时空插值方法,并以 2015 年中国江苏省 NPP/VIIRS 月度影像修复为例,对其插值精度和适用性进行探讨。

1 研究区与数据预处理

江苏省位于 116°18'E~121°57'E、30°45'N~35°20'N,是长江三角洲经济带的重要组成部分,人均 GDP、综合竞争力、地区发展与民生指数均居中国各省第一。

本文选择江苏省 2015 年 1 月—12 月共 12 期的 VCM 月度 NPP/VIIRS 影像作为实验数据,数据来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NO-

AA)。原始 VCM 数据中杂散光、闪电光已经被剔除,但是火光、船只以及其他临时性灯光未被剔除;此外,月度数据还存在负值像元。在数据预处理过程中,首先将负像元值赋值为 0,再进行临时灯光去除。考虑到如果一个国家或地区没有自然灾害等重大事件发生,那么该区域的灯光亮度在连续的月份间不应出现剧烈变化。鉴于此,本文借助箱线图中稳健统计量来识别临时灯光像元。提取每个像元 1 月—12 月有效像元值(非 0 值)构成时间序列 x ,其中 t 月份稳定灯光像元值 x_t ($1 \leq t \leq 12$) 满足:

$$Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \leq x_t \leq Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (1)$$

式中, Q_1 为时间序列 x 的下四分位数; Q_3 为时间序列 x 的上四分位数。

当像元值 x_t 位于箱线图最大上限或最小下限以外时,认为该像元为数据缺失或异常像元,将其赋值为 0,作为插值对象。经数据预处理后,江苏省 2015 年 VCM 月度影像待插值像元占总像元的比例见表 1,其中 6 月份待插值像元占比最高,达到 40.84%。

表 1 VCM 月度数据待插值像元占比

Tab.1 Proportion of VCM Data to be Interpolated

月份/月	待插值像元占比/%	月份/月	待插值像元占比/%
1	22.41	7	21.81
2	20.00	8	8.10
3	11.20	9	8.10
4	14.90	10	11.39
5	25.27	11	18.11
6	40.84	12	27.67

2 插值方法

2.1 基本思路及实现过程

本文插值方法的基本思路是:以时、空关系互相作为约束条件,将时序变化一致性较好的像元数据作为空间维度插值的参考,将空间关系一致性较好的月度数据作为时序维度插值的参考;利用参考值及其与待插值的差值进行像元值的初步估计,进一步根据时、空一致性关系,借助卷积运算求得待插值像元的时空插值结果。为了简便起见,本文将以时序变化一致性为依据,利用空间邻近像元作为参考值进行插值的方法简称为空间维度插值;以空间关系一致性为依据,利用时序邻近像元作为参考值进行插值的方法简称时间维度插值;将二者插值进行一步加权混

合的方法称为综合时空插值,简称时空插值。

本文方法的实现过程借助卷积运算完成。卷积运算是一种在空间域中对图像进行邻域检测的算法,可用于图像平滑、信号处理和转换边缘检测等,其本质是通过图像邻域像素的加权求和得到卷积值,使用的加权矩阵称为卷积模板或卷积核。为了得到不同维度的插值结果,首先从时间和空间维度分别评估邻域数据集与包含待插值数据的数据集的一致性,并将该一致性指标的标准化值作为插值结果的可靠性权重系数;然后构建不同的卷积核计算时间和空间维度插值,进而将不同维度插值结果加权融合,得到缺失数据的最终插值结果。时空插值方法技术路线如图1所示。

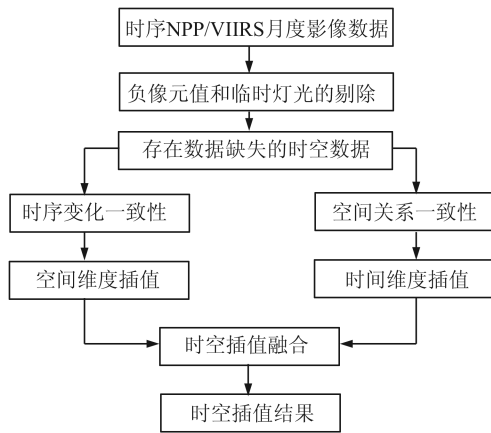


图1 时空插值技术路线

Fig.1 Flowchart of Spatio-temporal Interpolation

2.2 时空一致性指标

数据插值即从有限已知数据推测出未知数据值,选择合适的插值参考是插值过程至关重要的步骤。待插值数据集与参考数据集的一致性越高,插值结果精度越高。为此,构建一致性指标评价待插值数据集与参考数据集的时空一致性。设 $l=[l_1, l_2, \dots, l_n]$ 和 $L=[L_1, L_2, \dots, L_n]$ 为长度相等的两个向量,两个向量具有可比的数据尺度和单位, $\Delta=[\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n]$ 为向量 l 和 L 的元素差值向量,即 $\Delta_m=l_m-L_m$, l_m 、 L_m 和 Δ_m 分别代表向量 l 、 L 和 Δ 中第 m 个元素值。 Δ 中元素的标准差代表向量元素的离散程度,标准差越小,元素 Δ_m 越趋近同一值,则向量 l 和 L 元素的值呈现同步变化规律。基于此,本文构建一致性指标 $\text{Sim}(l, L)$, 评价向量 l 和 L 的一致性,计算式为:

$$\text{Sim}(l, L) = (\epsilon + \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (\Delta_m - \bar{\Delta})^2}{n-1}})^{-1} \quad (2)$$

式中, $\bar{\Delta}$ 为向量 Δ 中元素的平均值; n 为向量 Δ 的长度; ϵ 为一个正的无穷小量(避免分母为零的情况); $\text{Sim}(l, L)$ 为 l 与 L 向量的一致性程度,其值越大, l 与 L 向量的同步变化一致性越高,反之越低。

2.3 空间维度插值

空间维度插值是根据数据缺失像元所在时间序列与邻域像元时间序列的同步性规律选择空间插值的参考像元,利用估算的待插值像元与参考像元的差值,完成待插值像元值的估计,结果如图2(a)所示。

设 $S_{i,j}$ 为 i 行 j 列的时间序列向量, $S_{i,j}^t$ 代表 t 月份 i 行 j 列的像元值, $S_{i,j+2}$ 为 $S_{i,j}$ 邻域内某一时间序列向量, $S_{i,j+2}^t$ 代表 $S_{i,j+2}$ 中与 $S_{i,j}^t$ 处于同一月份的邻域像元值,当向量 $S_{i,j}$ 或 $S_{i,j+2}$ 中存在其他缺失数据时,去除另一向量中的对应数据。假设 $S_{i,j}^t$ 为缺失数据,计算向量 $S_{i,j}$ 和 $S_{i,j+2}$ 向量的一致性指标 $\text{Sim}(S_{i,j}, S_{i,j+2})$, 同时求得向量 $S_{i,j}$ 和 $S_{i,j+2}$ 中对应元素差值的均值 $\bar{\Delta}_{i,j+2}$; 以 $S_{i,j+2}$ 作为插值参考时,数据缺失像元 $S_{i,j}^t$ 的估计值计算式为:

$$\hat{S}_{i,j}^t = S_{i,j+2}^t + \bar{\Delta}_{i,j+2} \quad (3)$$

式中, $\hat{S}_{i,j}^t$ 为数据缺失像元的估计值; $S_{i,j+2}^t$ 为向量 $S_{i,j+2}$ 中与 $S_{i,j}^t$ 处于同一个时间节点相邻像元值; $\bar{\Delta}_{i,j+2}$ 为向量 $S_{i,j}$ 和 $S_{i,j+2}$ 中对应元素差值平均值。

将数据缺失像元某个邻域(以 5×5 为例)内时间序列作为插值参考,计算待插值向量 $S_{i,j}$ 与插值参考 $S_{i,j+2}$ 的一致性指标 $\text{Sim}(S_{i,j}, S_{i,j+2})$, 并将其标准化至 $[0, 1]$, 计算式为:

$$\text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i,j+2}) = \frac{\text{Sim}(S_{i,j}, S_{i,j+2}) - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}} \quad (4)$$

式中, $\text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i,j+2})$ 代表一致性指标 $\text{Sim}(S_{i,j}, S_{i,j+2})$ 的标准化结果,取值范围为 $[0, 1]$; Max、Min 为数据缺失像元 5×5 邻域内时空一致性的最大值、最小值。

借助卷积运算构建空间维度插值矩阵 \hat{S} 和空间维度卷积核 K , 计算式分别为:

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} \hat{S}_{i-2,j-2}^t & \hat{S}_{i-2,j-1}^t & \hat{S}_{i-2,j}^t & \hat{S}_{i-2,j+1}^t & \hat{S}_{i-2,j+2}^t \\ \hat{S}_{i-1,j-2}^t & \hat{S}_{i-1,j-1}^t & \hat{S}_{i-1,j}^t & \hat{S}_{i-1,j+1}^t & \hat{S}_{i-1,j+2}^t \\ \hat{S}_{i,j-2}^t & \hat{S}_{i,j-1}^t & 0 & \hat{S}_{i,j+1}^t & \hat{S}_{i,j+2}^t \\ \hat{S}_{i+1,j-2}^t & \hat{S}_{i+1,j-1}^t & \hat{S}_{i+1,j}^t & \hat{S}_{i+1,j+1}^t & \hat{S}_{i+1,j+2}^t \\ \hat{S}_{i+2,j-2}^t & \hat{S}_{i+2,j-1}^t & \hat{S}_{i+2,j}^t & \hat{S}_{i+2,j+1}^t & \hat{S}_{i+2,j+2}^t \end{bmatrix} \quad (5)$$

$K =$

$$K = \begin{bmatrix} \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-2,j-2}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-2,j-1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-2,j}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-2,j+1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-2,j+2}) \\ \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-1,j-2}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-1,j-1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-1,j}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-1,j+1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i-1,j+2}) \\ \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i,j-2}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i,j-1}) & 0 & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i,j+1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i,j+2}) \\ \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+1,j-2}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+1,j-1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+1,j}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+1,j+1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+1,j+2}) \\ \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+2,j-2}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+2,j-1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+2,j}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+2,j+1}) & \text{Sim}'(S_{i,j}, S_{i+2,j+2}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)中, $\hat{S}'_{i,j+1}$ 是以 $S_{i,j+1}$ 作为插值参考时, 数据缺失像元的估计值。进而得到数据缺失像元的空间维度插值 R_{space} , 计算式为:

$$R_{\text{space}} = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \hat{S}(i,j) K(i,j)}{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 K(i,j)} \quad (7)$$

2.4 时间维度插值

时间维度插值是根据数据缺失像元及其空间邻域数据所在的数据集与其他月份相同位置像元的一致性作为依据, 选取时序参考数据进行插值, 结果如图 2(b) 所示。

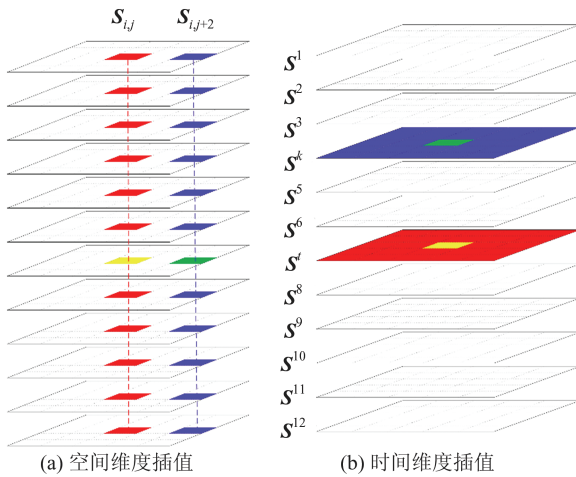


图 2 不同插值方法示意图

Fig.2 Schematic Diagram of Different Interpolation Methods

S^t 为 t 月份包含缺失数据的空间数据集, $S'_{i,j}$ 代表数据缺失像元值, S^k 为 k 月份与 S^t 行列号相同的数据集, $k \neq t$, $S^k_{i,j}$ 代表 S^k 中与 $S'_{i,j}$ 处于不同时间节点但行列号相同的像元值。当向量 S^k 或 S^t 中存在其他缺失数据时, 去除另一向量中对应数据, 计算两个数据集的一致性指标 $\text{Sim}(S^t, S^k)$, 将向量 S^t 和 S^k 按照先行后列顺序排列组成一维向量, 同时求得 S^t 和 S^k 中对应元素差值的平均值 $\bar{\Delta}_k$; $\hat{S}'_{i,j}$ 代表以 S^k 作为插值参考时数据缺失像元 $S'_{i,j}$ 的估计值, 计算式为:

$$\hat{S}'_{i,j} = S^k_{i,j} + \bar{\Delta}_k \quad (8)$$

类似地, 以其他月份空间数据作为插值参考, 分别计算待插值向量 S^t 与插值参考的一致性

指标, 并将其标准化至 $[0, 1]$, 借助卷积运算构建时间维度插值矩阵 \hat{S}' 和时间维度卷积核 K' , 计算式分别为:

$$\hat{S}' = [\hat{S}'_{i,j}, \hat{S}'_{i,j}, \dots, \hat{S}'_{i,j}, \dots, 0, \dots, \hat{S}'_{i,j}, \hat{S}'_{i,j}] \quad (9)$$

$$K' = [\text{Sim}'(S^t, S^1), \text{Sim}'(S^t, S^2), \dots, \text{Sim}'(S^t, S^k), \dots, 0, \dots, \text{Sim}'(S^t, S^{11}), \text{Sim}'(S^t, S^{12})] \quad (10)$$

式中, $\hat{S}'_{i,j}$ 代表以 S^k 作为插值参考时数据缺失像元 $S'_{i,j}$ 的估计值; $\text{Sim}'(S^t, S^k)$ 为一致性指标 $\text{Sim}(S^t, S^k)$ 的标准化结果。进而得到数据缺失像元的时间维度插值 R_{time} , 计算式为:

$$R_{\text{time}} = \frac{\sum_{k=1}^{12} \hat{S}'(i,j) K'(k)}{\sum_{k=1}^{12} K'(k)} \quad (11)$$

2.5 综合时空插值

将数据缺失像元的空间维度插值 R_{space} 和时间维度插值 R_{time} 融合, 得到综合时空插值 R_{st} , 计算式为:

$$R_{\text{st}} = \frac{R_{\text{space}} \times q_{\text{space}} + R_{\text{time}} \times q_{\text{time}}}{q_{\text{space}} + q_{\text{time}}} \quad (12)$$

式中, q_{space} 和 q_{time} 分别为空间和时间维度插值时参与运算的初步估计值的一致性指标之和。

3 结果与分析

图 3 为江苏省 2015 年 6 月份不同插值方法影像插值结果, 鉴于可作为参考影像的数据较少, 同时便于与已有研究进行对比分析, 本文选择 VCMSL 作为参考影像, 将已有研究中插值精度较高的三次 Hermite 插值^[13]、空间维度插值和时间维度插值与时空插值方法进行对比, 从插值结果的灯光亮度总和、绝对误差、相对误差以及参与参考影像逐像元差值的整体方差等多个方面评价时空插值算法插值精度。

3.1 整体插值精度对比

3.1.1 灯光亮度总和

选择插值结果灯光值总和与参考影像进行对比, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, Hermite 插值在 1、6、7、11 月份插值结果偏高, 其中数据缺失最严重的 6 月份插值结果偏高现象最为明显,

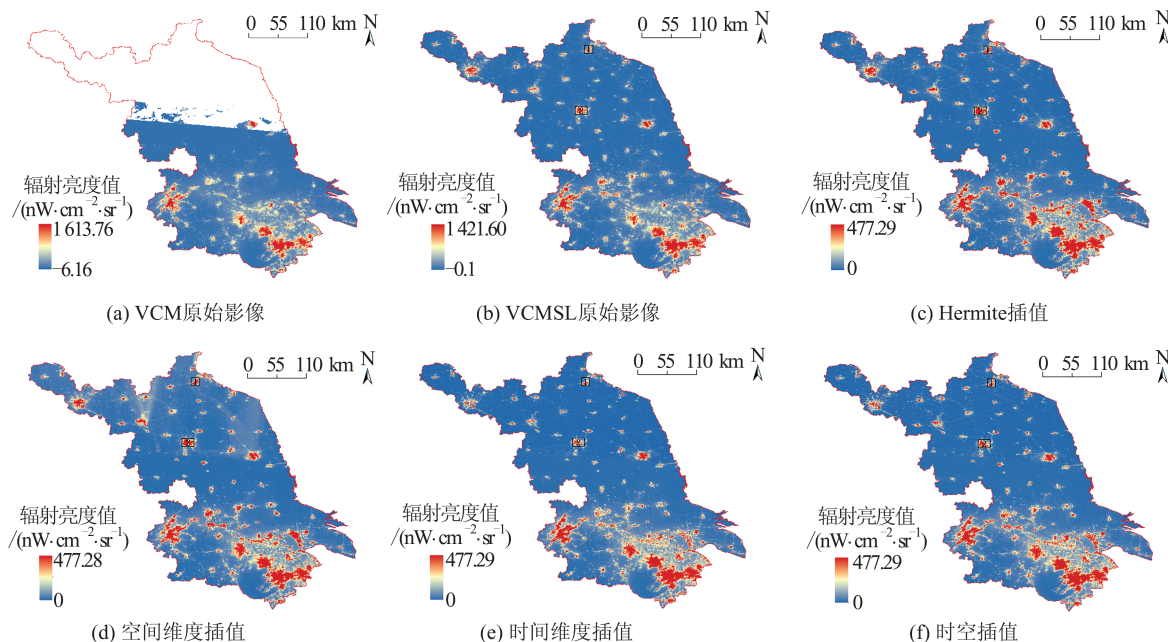


图3 江苏省2015年6月份插值结果

Fig.3 Interpolation Results of Jiangsu Province in June 2015

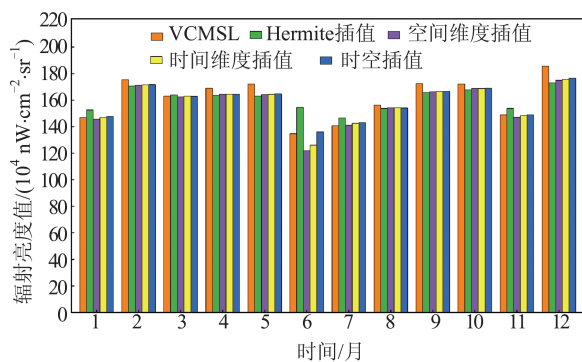


图4 插值结果灯光辐射亮度值总和

Fig.4 Sum Radiance Value of Interpolation Results

三次 Hermite 插值在 5、6、7 月份结果分别为 $163.12 \times 10^4 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 、 $154.60 \times 10^4 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 和 $146.52 \times 10^4 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 6 月份插值灯光亮度总和接近 5 月、7 月份灯光亮度总和的平均值。分析其原因在于三次 Hermite 插值仅考虑了像元值的时序关系, 忽略了 NPP/VIIRS 数据包含的重要空间信息, 当插值点与两个插值端点距离相同时, 插值结果接近两个插值端点的均值, 因此出现 6 月份插值结果灯光总和接近相邻月份灯光总和均值现象, 插值结果灯光亮度总和较参考影像偏高明显。空间维度插值以时序变化一致性较好的像元的数据作为插值的参考, 顾及到像元的空间关联性, 仍无法满足数据大范围缺失的插值要求, 12 个月份的插值结果中有 11 个月份低于同时期参考影像, 6 月份灯光总和偏低最明显。时间维度插值以空间关系一致性较好的月度数

据作为插值参考, 更侧重像元的时间趋势性, 插值精度有一定提高, 但 6 月份灯光亮度总和仍有较大偏差。时空插值以时、空关系互相作为约束条件, 插值过程综合考虑了 NPP/VIIRS 数据时间趋势性和空间关联性, 在 4 种插值方法中插值结果精度最高, 单一月份插值结果灯光亮度总和未出现较大偏差, 较同时期参考影像灯光总和最接近。

3.1.2 绝对误差与相对误差

图 5 为不同插值方法的插值结果与参考数据的误差对比。由图 5(a) 可以看出, Hermite 插值结果的绝对误差连续 12 个月均为最大, 其中 6 月绝对误差为 $19.94 \times 10^4 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 为全年绝对误差最大月份, 12 月灯光总和出现较大负偏差, 绝对误差为 $-12.52 \times 10^4 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。空间维度插值的绝对误差有 11 个月份为负偏差, 整体插值结果偏低。时间维度插值的绝对误差在 1、3、7 月份均小于时空插值, 但其他月份均大于时空插值。时空插值 6 月份灯光亮度总和的绝对误差仅为 $2.31 \times 10^4 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 12 个月份中有 9 个月份的绝对误差值在 4 种插值方法中最小。从图 5(b) 可以看出, 三次 Hermite 插值、空间维度插值和时间维度插值的最大相对误差均出现在 6 月份, 最大相对误差分别为 14.81%、9.42% 和 6.34%, 而时空插值 6 月份相对误差仅 1.04%, 全年最大月份相对误差为 4.85%, 插值结果精度最高。此外, 三次 Hermite 插值、空间维度插值和时间维度插值的相对误差在不同月份出现较大波动, 而时空插值的相对误差较平稳, 未

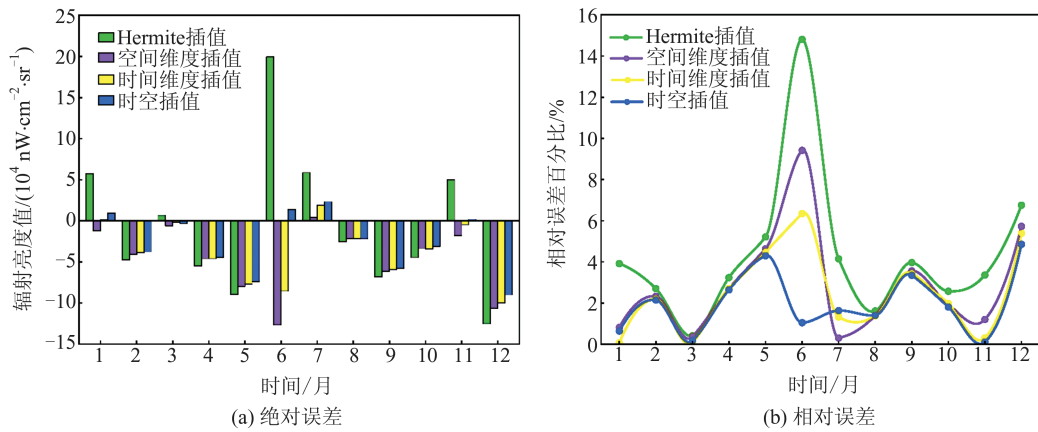


图 5 插值结果与参考数据的误差对比

Fig. 5 Error Comparison Between Interpolation Results and Reference Data

出现较大波动;与其他 3 种插值方法相比,时空插值方法稳定性更好,插值结果不会因季节变化出现较大偏差。

3.1.3 逐像素差值的整体方差

为了验证插值结果与参考影像的整体吻合程度,将不同月份插值结果与同时期参考影像逐像素作差,计算逐像素差值的方差,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看到,4 种方法的插值结果与参考影像逐像素差值的整体方差较为接近,整体方差最大值均出现在 6、7 月份,其中时空插值方法逐像素差值的整体方差有 10 个月均为最小,表明插值结果影像与参考影像越相近;与其他 3 种插值方法相比,时空插值方法的插值结果与参考影像整体吻合度最高。

3.2 局部插值精度对比

本文以数据缺失最严重的 6 月份为例,选

择图 3 中区域 1 和区域 2 作为两个局部区域,进行不同方法的局部插值精度对比,结果见表 2。

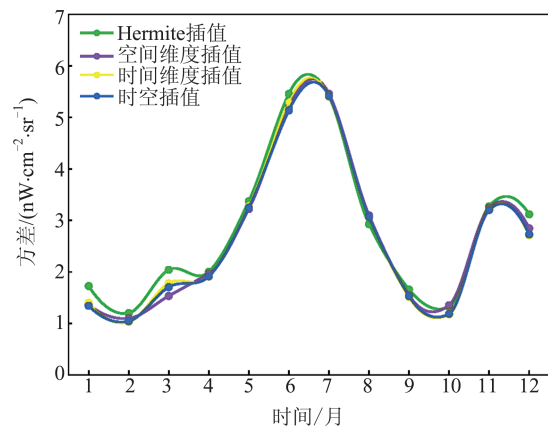


图 6 插值结果与参考影像逐像素差值的方差

Fig. 6 Variance of Differences Between Interpolation Results with Reference Data

表 2 不同方法的局部插值精度

Tab. 2 Accuracies of Different Methods in Local Areas

插值方法	区域 1			区域 2		
	绝对误差 $/(nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1})$	相对误差 $\%$	方差 $/(nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1})$	绝对误差 $/(nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1})$	相对误差 $\%$	方差 $/(nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1})$
Hermite 插值	2 262.15	25.01	2.69	5 737.08	28.24	5.48
空间维度插值	-2 874.13	31.78	3.11	-7 699.67	37.90	5.58
时间维度插值	2 744.63	23.28	2.68	6 064.69	29.85	5.22
时空插值	-1 254.68	13.87	2.55	-3 762.37	18.52	4.86

由表 2 可知,相较于 Hermite 插值,时空插值在区域 1 的灯光总和相对误差由 25.01% 降低至 13.87%,与参考影像逐像素差值方差由 $2.69 nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$ 降低至 $2.55 nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$;区域 2 的灯光总和相对误差由 28.24% 降低至 18.52%,逐像素差值方差由 $5.48 nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$

降低至 $4.86 nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$ 。总体来看,时空插值的局部插值精度最高,时间维度插值次之,空间维度插值效果最差。

3.3 年度影像对比

通过求均值的方式将月度影像合成年度影像,与 NOAA 提供的 VCM ORM (VIIRS cloud

mask-outlier removed)年度影像进行对比,结果见表3。

由表3可知,时空插值合成的年度影像的灯光总和、像元平均值与年度影像更接近,灯光总和和相对误差低至2.20%。4种插值方法的像元最大值在 $270 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 左右,与年度影像相比偏差较大,查看原始影像数据发现,VCM ORM年度影像中像元值大于 $282.87 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 仅有1个像元,且该像元5月份辐射亮度值为 $1\,155.14 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,数据预处理时,该像元值被识别为临时灯光像元,影像插值时,该

像元被重新赋值,因此该像元插值结果小于VCM ORM年度影像像元值。此外,Hermite插值时所有插值结果均在已有数据范围内不会出现插值结果越界现象,而时间维度和空间维度插值可能出现插值结果为负值,当插值结果为负值时,认为该插值结果无效,将插值结果及其权重赋值为0,因此时空插值方法插值结果未出现负像元值。通过逐像元差值的整体方差对比发现,时空插值结果与年度影像插值整体方差最小,与年度影像吻合度最高。

表3 年度影像合成结果对比

Tab.3 Comparison of Annual Image Synthesis Results

统计对象	灯光总和 $/(10^4 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	灯光总和 相对误差/%	像元最大值 $/(\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	像元平均值 $/(\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	方差 $/(\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
VCM ORM影像	164.73	—	368.63	2.91	—
Hermite插值影像	160.72	2.44	282.87	2.83	1.25
空间维度插值影像	157.82	4.20	262.04	2.79	1.30
时间维度插值影像	158.81	3.60	269.84	2.80	1.22
时空插值影像	161.11	2.20	277.01	2.84	1.20

4 结 语

针对NPP/VIIRS月度影像数据缺失问题,本文以2015年江苏省NPP/VIIRS月度影像插值为例,将时、空关系互相作为约束条件,分别进行了空间维度插值、时间维度插值和时空插值实验,得到的主要结论如下:

1)空间维度插值虽然顾及到像元的空间关联性,仍无法满足数据大范围缺失的插值要求,插值结果整体偏低。

2)时间维度插值考虑到像元的时间趋势性,插值精度较空间维度插值有一定提高,但部分月份插值结果有较大偏差。

3)相较于三次Hermite插值,时空插值获得的月度数据灯光亮度总和最大相对误差由14.81%降至4.85%,年度影像灯光亮度总和相对误差由2.44%降至2.20%,逐像元差值整体方差由1.25降至1.20。

总的来看,本文中时空插值方法在插值过程中同时顾及到NPP/VIIRS数据时间平稳性和空间结构稳定性,插值精度明显提高,且对待插值月份前后时序数据没有严格要求,更具广泛性。

值得注意的是,邻域参考数据范围的大小对时空插值精度和运算效率都有较大影响。通过

多次实验发现,选择数据缺失像元 3×3 邻域像元作为插值参考时,可作为插值参考的数据集较少,插值结果较差;选择 5×5 邻域像元为参考时,可以得到较好的插值结果;如果继续扩大参考像元邻域范围至 7×7 ,将导致计算量显著增加,算法效率降低,因此,本文以数据缺失像元 5×5 邻域内数据集作为插值参考。虽然本文中综合时空插值精度更高,但是该方法也存在一定不足之处,即在插值起始位置必须找到有效的参考数据。如果某一月份数据全部缺失,则需要扩大插值范围,从可以找到有效参考位置进行影像插值,然后提取所需范围影像,由此可能会带来计算量的增加,对时间成本有较高的要求。

参 考 文 献

- [1] Elvidge C D, Sutton P C, Pettit D R, et al. Overview of the Nightsat Mission Concept[C]//2007 Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, France, 2007
- [2] Ma T. Multi-Level Relationships Between Satellite-Derived Nighttime Lighting Signals and Social Media-Derived Human Population Dynamics[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1128
- [3] Tan M H, Li X B, Li S J, et al. Modeling Population Density Based on Nighttime Light Images and

- Land Use Data in China [J]. *Applied Geography*, 2018, 90: 239-247
- [4] Li Xi, Xue Xiangyu. Estimation Method of Nighttime Light Images' Electric Power Consumption Based on the Boston Matrix [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1994-2002 (李熙, 薛翔宇. 基于波士顿矩阵的夜光遥感电力消费估算方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 1994-2002)
- [5] Shi K F, Yu B L, Zhou Y Y, et al. Spatiotemporal Variations of CO₂ Emissions and Their Impact Factors in China: A Comparative Analysis Between the Provincial and Prefectural Levels [J]. *Applied Energy*, 2019, 233/234: 170-181
- [6] Yu B L, Tang M, Wu Q S, et al. Urban Built-up Area Extraction from Log-Transformed NPP-VIIRS Nighttime Light Composite Data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(8): 1279-1283
- [7] Liu Quanyi, Zhan Qingming, Li Jiansong, et al. Extracting Built-up Areas Using LuoJia 1-01 Nighttime Light Imageries in Wuhan, China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 30-39 (刘权毅, 詹庆明, 李建松, 等. 珞珈一号夜间灯光影像在建设用地上提取中的应用: 以武汉市为例 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1): 30-39)
- [8] Zhao X Z, Yu B L, Liu Y, et al. Estimation of Poverty Using Random Forest Regression with Multi-Source Data: A Case Study in Bangladesh [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 375
- [9] Elvidge C D, Baugh K E, Zhizhin M, et al. Why VIIRS Data are Superior to DMSP for Mapping Nighttime Lights [J]. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 2013, 35: 62-69
- [10] Qiu S, Shao X, Cao C Y, et al. Vicarious Validation of Straylight Correction for VIIRS Day/Night Band Using Dome-C [C]//SPIE Optical Engineering Applications, San Diego, California, USA, 2015
- [11] Mills S, Weiss S, Liang C. VIIRS Day/Night Band (DNB) Stray Light Characterization and Correction [C]//SPIE Optical Engineering Applications, San Diego, California, USA, 2013
- [12] Bennett M M, Smith L C. Advances in Using Multi-temporal Night-Time Lights Satellite Imagery to Detect, Estimate, and Monitor Socioeconomic Dynamics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 176-197
- [13] Chen Mulin, Cai Hongyan. Interpolation Methods Comparison of VIIRS/DNB Nighttime Light Monthly Composites: A Case Study of Beijing [J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(1): 126-138 (陈慕琳, 蔡红艳. 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, 2019, 38(1): 126-138)
- [14] Zhang Haiping, Zhou Xingxing, Dai Wen. A Preliminary on Applicability Analysis of Spatial Interpolation Method [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(6): 14-18 (张海平, 周星星, 代文. 空间插值方法的适用性分析初探 [J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(6): 14-18)
- [15] Wang Changpeng, Liang Yong, Sun Liming, et al. A Method for Constructing Smooth Geological Surfaces with Mixed Geometric Curvature and Kriging Interpolation [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(1): 62-65 (王长鹏, 梁勇, 孙黎明, 等. 一种混合几何曲率和克里金插值的平滑地质曲面构建方法 [J]. 测绘地理信息, 2020, 45(1): 62-65)
- [16] Liu Xiaoying. Research on Spatial Interpolation Method of Air Vibration Index Based on GIS [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015 (柳笑盈. 基于 GIS 的空气振动指数空间插值方法研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015)
- [17] Liu Tianjia. Research on Interpolation Method of Tidal Data [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017 (刘田甲. 潮汐数据插值方法研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2017)
- [18] Duan Yue, Shu Hong, Hu Hongda. Using Fixed Rank Filtering to Make Spatio-Temporal Interpolation of MODIS Temperature [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(8): 1027-1033 (段悦, 舒红, 胡泓达. 利用 MODIS 温度产品进行秩修正滤波 FRF 时空插值 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(8): 1027-1033)
- [19] Yu Guixing. A Spatio-Temporal Interpolation Method Based on the Stationarity of Time Series [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014 (尉桂兴. 顾及时序平稳性的时空插值方法研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2014)
- [20] Li Yan, Wang Lina. Research of Spatio-Temporal Interpolation Algorithm Based on Time Series [J]. *Computer Science*, 2014, 41(S1): 414-416 (李彦, 王丽娜. 基于时间序列的时空插值算法改进研究 [J]. 计算机科学, 2014, 41(S1): 414-416)
- [21] Zhao N Z, Hsu F C, Cao G F, et al. Improving Accuracy of Economic Estimations with VIIRS DNB Image Products [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5899-5918

Spatiotemporal Interpolation Method of NPP/VIIRS Sequence Images Considering Neighbor Relationships

CHENG Gang^{1,2} LI Yanlin³ ZHAO Zongze¹ YANG Jie¹
LU Xiaoping^{1,2} YUAN Dongfang¹

1 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

2 Key Laboratory of Spatiotemporal Information and Ecological Restoration of Mines, Ministry of Natural Resources,
Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The problem of missing data in the monthly nocturnal visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) remote sensing images has become one of the limitations for application. Exploring practical data processing methods to obtain high-quality spatiotemporal continuous VIIRS monthly image data has become necessary for night time light remote sensing research. **Methods:** A spatiotemporal interpolation method of image elements using the correlation of feature proximity relationship is proposed. The image element data with good consistency of temporal variation is used as the reference for spatial interpolation. The monthly data with good consistency of spatial relationship is used as the reference for temporal interpolation, and the spatiotemporal interpolation of the image element to be interpolated is obtained by constructing different convolution kernels to convolve the preliminary interpolation results in temporal and spatial dimensions, respectively. **Results:** Taking the monthly night time light remote sensing image restoration of Jiangsu Province in 2015 as an example, we compare and analyze the spatiotemporal interpolation methods in different dimensions. Compared with the three Hermit interpolations, the maximum relative error of the monthly image light brightness sum, the relative error of the annual image light brightness sum, and the image-by-image difference obtained by the spatiotemporal interpolation method are significantly reduced. **Conclusions:** The proposed spatiotemporal interpolation method takes both the temporal trend smoothness and spatial structure stability of VIIRS data into account in the interpolation process, and the image interpolation accuracy is significantly improved. The proposed method is more extensive because there is no strict requirement for the time series data before and after the month to be interpolated.

Key words: night time light remote sensing; visible infrared imaging radiometer suite(VIIRS); convolution operation; spatiotemporal interpolation; image repairing; neighbor relationships

First author: CHENG Gang, PhD, professor, specializes in geospatial information service and processing. E-mail: chenggang1218@163.com

Corresponding author: ZHAO Zongze, PhD, lecturer. E-mail: zhaozongze@hpu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China(2016YFC08033103); the National Natural Science Foundation of China (41001226); China Postdoctoral Science Foundation(2015M582831); the Fundamental Research Funds for Universities of Henan Province(NSFRF180329).

引文格式: CHENG Gang, LI Yanlin, ZHAO Zongze, et al. Spatiotemporal Interpolation Method of NPP/VIIRS Sequence Images Considering Neighbor Relationships[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 252-260. DOI: 10.13203/j.whugis20200019(程钢, 李岩林, 赵宗泽, 等. 顾及邻近关系的 NPP/VIIRS 序列影像时空插值方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(2): 252-260. DOI: 10.13203/j.whugis20200019)