

基于哨兵卫星数据的巴丹吉林—腾格里沙漠辐射准不变场选取与评价

王玮¹, 王丽娟², 郭锐², 胡秀清³, 王玲³

1. 中国民用航空飞行学院 航空气象学院, 广汉 618307;

2. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 兰州 730020;

3. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 中国气象局, 北京 100081

摘要: 选取符合长历时遥感数据辐射定标要求的地面场地, 对建立统一的辐射定标参考标准, 改进卫星辐射定标精度, 推动量化产品应用都具有十分重要的意义。本研究利用2018年11月—2021年10月覆盖整个研究的Sentinel-2 A/B MSI遥感数据, 结合变异系数(CV)指标和 $Getis-Ord G_i^*$ 空间聚类方法, 从时空稳定性和空间一致性两个方面对研究区进行综合评价, 筛选和评价可用于历史气象卫星数据进行可见光—短波红外波段辐射定标的场地, 结果表明:(1) 研究区具有时空稳定性和空间均匀性的辐射准不变场主要分布在巴丹吉林—腾格里沙漠的西部、北部、以及沙漠南部边缘与中卫、河西走廊之间的连接处;(2) 本研究通过改进场地选取方法, 降低了场地评价结果的不确定性, 所选取16个场地的平均时空变异系数 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 仅为1.59%;(3) 研究区TNGR_1和TNGR_3场地的 $CV_{SR_{b1-12_avg}} \leq 1.19%$, 优于国际同类场地的评价结果, 且这两个场地全年平均无云天数接近300 d, 具有空间面积大、时空稳定性好、地表均一、大气干洁, 云雨天气少等特点, 为开展历史气象卫星数据再定标研究提供了更丰富亮度的准不变定标场地。

关键词: 沙漠, 定标场, Sentinel-2, 空间聚类, 变异系数

中图分类号: P2

引用格式: 王玮, 王丽娟, 郭锐, 胡秀清, 王玲. 2023. 基于哨兵卫星数据的巴丹吉林—腾格里沙漠辐射准不变场选取与评价. 遥感学报, 27(10): 2350-2362

Wang W, Wang L J, Guo R, Hu X Q and Wang L. 2023. Selection and evaluation of pseudo-invariant calibration sites in the Badain Jaran and Tengger Desert of China based on Sentinel satellite data. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2350-2362[DOI:10.11834/jrs.20231867]

1 引言

辐射定标是遥感信息定量化的前提和基础, 其定标精度直接决定了定量遥感产品的质量。特别是在卫星发射后, 由于仪器元件老化等自身原因和外界因素的干扰, 传感器性能会与发射前的试验结果之间存在一定的偏差(田庆久等, 1998; Smith等, 2002; 卢乃锰等, 2020)。以地面目标为参照基准的场地辐射定标, 不仅可以弥补无在轨星上定标技术之不足, 而且还可以实现对卫星传感器运行状态下多场景的绝对定标, 是目前卫星传感器在轨替代定标中广泛采用的技术方法(Ohring等, 2007; 胡秀清等, 2009; 孙凌等,

2013)。因此, 在卫星发射后选取理想的辐射定标场, 建立统一的辐射定标参考标准, 对改进卫星辐射定标精度, 提高遥感反演产品质量, 以及推动量化产品应用和全球观测系统的发展都具有十分重要的意义。

准不变定标场PICS(Pseudo-Invariant Calibration Sites)是指在长时间序列上辐射性能具有较小变化的地表大面积均匀目标(Helder等, 2010)。理想的PICS不仅具有时空稳定的辐射性能, 而且还具备空间面积大、地表均一性好、大气干洁、气溶胶含量低, 以及反射率高等特点(巩慧等, 2010; 顾行发等, 2013)。研究表明, 位于沙漠、戈壁、干湖床等表面因具有长期稳定、高反射率、云雨

收稿日期: 2022-01-10; 预印本: 2022-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2018YFB0504901); 国家自然科学基金(编号:41805086, 42105131)

第一作者简介: 王玮, 研究方向为卫星遥感定标理论与技术方法。E-mail: wangwei9969@163.com

天气少、面积大、地表均一等属性, 通常被选用卫星传感器的辐射定标场 (Hu 等, 2012)。Cosnefroy 等 (1996) 利用 Meteosat-4 卫星影像, 在北非撒哈拉沙漠和阿拉伯沙漠地区, 使用空间变异系数作为度量空间均匀性的指标, 筛选出 20 个面积 $\geq 100 \text{ km}^2$, 且空间均匀性优于 3% 的区域, 并广泛应用于 NOAA6/7/9 AVHRR 卫星传感器的辐射定标工作。Mitchell 等 (1997) 利用亮度、时间稳定性、光谱稳定性和空间均匀性, 并结合地形地貌、大气环境特点, 对澳大利亚的 6 个沙漠和戈壁场地进行比较分析, 选出了澳大利亚南部戈壁区域作为 AVHRR 卫星传感器在当地的辐射校正场。Bannari 等 (2004) 利用不同空间分辨率的卫星遥感资料, 在评价位于美国内华达州干盐湖床的时空一致性时发现, 辐射定标精度会受到区域气候变化和湖床表面干燥度的影响, 同时还指出 Getis 统计方法可有效弥补 CV 在空间局部评价时的不确定性。Odongo 等 (2014) 基于 Getis 统计和 CV 方法, 初步建立了辐射定标场的选取依据和指标, 并利用长时间序列 Landsat TM 数据对土耳其境内的季节性盐湖进行空间一致性评估。Bacour 等 (2019) 在重新评估位于北非撒哈拉沙漠和阿拉伯沙漠地区准不变定标场的时空一致性时指出, 受全球气候变化影响, 补充与更新辐射定标场地是确保卫星辐射定标精度的重要环节。Khadka 等 (2021) 利用 Mann-Kendall 检验方法, 对全球 6 个 PICS 场进行时空一致性分析结果表明, 气候变化和异常天气是引起辐射定标场时空稳定性趋势出现异常或突变的重要因素。

目前中国拥有风云气象、环境、资源和高分等多个系列的卫星遥感资料, 已被广泛应用于天气和气候预报, 以及环境、农业和自然灾害监测等多个领域, 为国家经济发展做出了重要贡献 (卢乃锰和谷松岩, 2016; 梁顺林等, 2016)。中国在辐射场地定标方面, 虽然已经初步建成了敦煌陆地定标试验场、青海湖水面定标试验场, 以及包头高分卫星综合定标场, 并分别针对中国风云系列气象卫星、环境卫星、海洋卫星、资源卫星和高分卫星等开展场地辐射定标工作与方法试验研究, 但由于进场次数和天气条件的限制, 还不能完全满足部分遥感器进行全年高频次辐射校正的要求 (胡秀清等, 2002; 韩启金等, 2015)。以敦煌陆地定标试验场为例, 虽然晴天日数较多,

但却主要集中在秋、冬两季, 很难满足全年多季节、多场次的星地同步观测 (王玲等, 2017)。与此同时, 中国已积累了 20 多年来自不同系列卫星传感器的气象卫星数据, 但受数据质量差异, 以及缺少统一定标基准和定标精度等因素的影响, 已严重制约了这些数据在全球大范围尺度气候变化和生态环境监测等领域的利用效率。因此, 需要进一步选取和丰富时空稳定性好, 且符合高频次、长历时辐射定标要求的新场地, 对精度较低和缺乏一致性的历史气象卫星数据开展再定标工作。

初步研究表明, 位于内蒙古自治区和甘肃境内的巴丹吉林—腾格里两大沙漠区域, 具有气候干旱, 空间面积大、地表均一、大气干洁, 气溶胶和水汽含量低等特点, 在大气特性和空间特征方面初步具备遴选辐射准不变场的条件和潜力 (何灵莉, 2020)。因此, 本研究在上述研究的基础上, 利用高分辨率的 Sentinel-2 A/B MSI 遥感数据集, 参考国际同类场地评价研究指标体系, 从时间稳定性和空间一致性两个方面对巴丹吉林—腾格里沙漠整个区域进行综合评价; 并聚合到典型光学载荷空间尺度, 筛选出可用于历史气象卫星数据进行可见光—短波红外载荷辐射定标的场地, 为长时间序列国产卫星数据进行历史再定标工作提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

巴丹吉林—腾格里两大沙漠属于典型的大陆性干燥气候, 冬季受内蒙古自治区高压的控制, 年降水量较小, 日照充足, 蒸发量大, 相对湿度低, 昼夜温差大 (马宁等, 2011; 张克存等, 2012)。两大沙漠区海拔介于 1200—1800 m 之间, 地貌类型以沙丘沙山为主, 年平均气温为 $8.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 年降水量为 56.9 mm, 年平均风速为 3.1 m/s (李万元等, 2015; 苏俊礼等, 2016)。由于位于河西走廊北缘, 受到青藏高原西北支气流的影响, 该地区也是中国沙尘源区之一。为更广泛和全面地评价该地区的时空一致性, 本研究将巴丹吉林—腾格里两大沙漠、以及民勤北部荒漠和黑河下游鼎新荒漠等周边作为一个整体研究区 (图 1)。

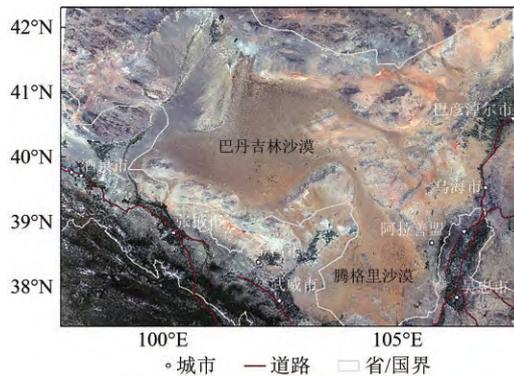


图1 基于Sentinel-2/MSI数据的研究区真彩色合成图
Fig. 1 True color composite map of the study area based on Sentinel-2/MSI data

2.2 Sentinel-2 A/B 数据选取

为了避免由数据空间分辨率、卫星重访周期等因素引起对评价结果的不确定性,本研究在选取卫星遥感数据时,尽可能按照时空分辨率高,覆盖范围大、光谱通道数量多和波段宽度窄等特性要求进行选择。通过对比目前公开常用Landsat 8 OLI、HJ-1B、GF-2和Sentinel-2等高时空分辨率卫星光学载荷的性能表明:在可见光—近红外波段, Sentinel-2/MSI数据不仅有较高的时空分辨率(10—60 m, 3—5 d),而且具有较窄的多光谱通道和较宽的刈幅,适合开展环境监测与地表精细评价方面的研究工作。

Sentinel-2 A/B卫星是欧空局“哥白尼计划”中发射的第二组卫星,其搭载的有效载荷为多光谱成像仪MSI(Multispectral Instrument)。MSI的幅宽为290 km,可覆盖从可见光至短波红外的13个波段,空间分辨率依波段的不同分为10 m、20 m和60 m等3种,双星组合后的重访周期为4—6 d,具有空间分辨率高、重访周期短、光谱波段通道数目多,以及波段宽度窄等特点(表1)。

通过欧空局哥白尼数据中心([https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home/\[2021-11-01\]](https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home/[2021-11-01])),下载了2018年11月—2021年10月覆盖整个研究区,且经过UTM/WGS84投影正射校正的Sentinel-2 A/B MSI L1C级遥感影像数据。利用官方发布的SNAP软件,首先对L1C级别数据进行数据格式的读取,然后利用Sen2cor插件,对L1C级产品进行基于查找表法LUT(Look Up Table)的不同复杂大气条件下的气溶胶光学厚度、反射率和相函数等指标计算,进行大气、地形、卷云和大气下垫面发射率

校正处理,完成大气校正和几何精校正预处理工作,最后输出生成空间分辨率为10 m,且校正级别更高的L2A级大气下垫面反射率影像数据(SR),同时生成了气溶胶厚度分布图、水汽分布图和场景分类图等环境质量空间分析辅助数据。

表1 Sentinel-2 A/B卫星光谱波段属性信息
Table 1 Sentinel-2 A/B satellite property information in spectral bands

空间分辨率/m	光谱波段	波长范围/nm	应用领域
10	2	440—538	
	3	537—582	陆表监测,海洋监测,极地监测等
	4	646—684	
	8	760—908	
20	5	694—713	
	6	731—749	植被监测,环境监测等
	7	769—797	
	8a	848—881	
60	11	1539—1682	云雪冰监测,植被监测,地质监测等
	12	2078—2320	
	1	430—457	大气校正(气溶胶,水蒸气,卷云)
	9	932—958	
	10	1337—1412	

为了便于计算,以及避免数据质量和天气等因素对研究结果的影响:(1)本研究利用ENVI5.4软件将B2、B3、B4、B8可见光和近红外波段处理为Geo-TIFF格式,投影方式转为阿伯斯投影(Albers),空间分辨率定义为10 m;(2)根据Sentinel-2 A/B自带的质量控制文件QA(Quality Assessment),剔除每幅影像上的空值、异常值和云像素;(3)结合研究区周边民勤、额济纳旗、巴彦诺日公等国家高空气象观测站资料,选取无沙尘和降水天气时段的遥感影像,建立了2018年11月—2021年8月覆盖整个研究区,且可用于场地精细评价的Sentinel-2 A/B有效数据集,共计446幅。

2.3 选场指标和方法

(1)时空CV评价。变异系数CV(Coefficient of Variation)是概率分布离散程度的归一化度量,可反映数据的离散程度。已有研究表明,在给定图像区域范围内,可以通过CV数值的变化程度来衡量选定位点观测值的稳定性(Rondeaux等,1998)。场地的空间均匀性和时间稳定评价实质是对地表辐射特性在时间和空间两个维度的评价,本研究利用变异系数衡量场地的时空稳定性(式(1))。

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

式中，当公式用于评价空间均匀性时， S 为计算窗口中各像元反射率的标准偏差 (S_s)， \bar{X} 是计算窗口中所有参与运算像元的平均值 (\bar{X}_s)，空间变异系数记作 CV_s ；当公式用于评价时间序列稳定性时，此时 S 为计算窗口中时间序列像元平均反射率的标准偏差 (S_t)， \bar{X} 是计算窗口中时间序列像元的平均值 (\bar{X}_t)，时间变异系数记作 CV_t 。

CV_s 值与计算窗口中各像元反射率的变化程度成正比，即 CV 值越大表明时空间稳定性越差。为匹配国产风云卫星典型光学载荷的空间分辨率 (250 m)，本研究选择 25×25 像元的计算窗口，以 1 个像元 (即 250 m) 的滑动步长分别计算空间平均值 (\bar{X}_s) 和标准偏差 (S_s)。为弥补研究区影像空间缺失，以及提高空间 CV_s 评价结果的可靠性，首先对研究区 Sentinel-2 A/B 有效数据集中每幅图像进行上述处理，生成空间 CV_s 图像，然后分别对 B2、B3、B4、B8 波段的所有空间 CV_s 图像进行时间序列像素空间叠加均值处理，最后生成覆盖整个研究区的平均时空 CV_{st} 图像。

出于评价结果可对比等方面的考虑，国内外相关研究普遍使用 CV 作为度量空间均匀性的指标，并将 $CV \leq 3\%$ 作为评价场地时空均匀性的阈值，并广泛应用于 NOAA6/7/9 AVHRR 卫星传感器的辐射定标工作 (Cosnefroy 等, 1996; Odongo 等, 2014)。因此，为了与国内外同类研究具有可比性，本研究选用 $CV \leq 3\%$ 作为评价研究区时空稳定性的阈值。

(2) Getis-Ord G_i^* 统计。本研究利用空间聚类分析方法评价研究区的一致性。通过使用局部 Getis-Ord G_i^* 指数识别具有统计显著性的高值区和低值区 (式 (2))。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{\left(n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n \omega_{ij} \right)^2 \right)}{n-1}}} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (4)$$

式中， x_j 是要素 j 的属性值， $\omega_{i,j}$ 是要素 i 和 j 之间的空间权重， n 为要素总数， G_i^* 统计是 Z 得分，因此无需做进一步的计算。

G_i^* 统计结果数据集包含 3 个属性字段： Z 得分、 P 值和置信区间。其中，当 $Z > 2$ 且 P 值小时，表示高值空间聚类区。即该区域数值变化范围较大，显著高于整个场地的平均值，呈现出显著的空间异质性分布特征。当 $Z < -2$ 且 P 值小时，表示该区域数值变化范围较小，为低值空间聚类区，接近整个场地的平均值，呈现出显著的空间一致性分布特征。当 Z 接近于 0，即， $-1.0 < Z < 1.0$ 时，表示不存在明显的空间聚类，无统计意义 (表 2)。本研究选取置信度为 99%，且 $Z < -2$ 和 P 值小的聚集区作为空间一致性的评价结果。

表 2 Getis-Ord G_i^* 统计结果属性表
Table 2 Getis-Ord G_i^* statistical results attribute table

Z 得分(标准差)	代表的含义
$Z > 2$ 且 P 值小	表示高值的空间聚类。置信度为 99% 的统计显著性
$Z > 1$ 且 P 值小	表示高值的空间聚类。 Z 得分越高，聚类程度越大
Z 接近于 0 即， $-1.0 < Z < 1.0$	表示不存在明显的空间聚类。无统计意义
$Z < -1$ 且 P 值小	表示低值的空间聚类。 Z 得分越低，聚类程度就越大
$Z < -2$ 且 P 值小	表示低值的空间聚类。置信度为 99% 的统计显著性

在此基础上，通过选取 $CV_{st} \leq 0.03$ 且 $G_i^* < -2.0$ 的空间统计结果，筛选出研究区同时具有时空稳定性和空间一致性的场地；然后利用 2018 年 11 月—2021 年 8 月 Sentinel-2 A/B MSI 数据集中所有波段的平均地表反射率数据 (除大气顶部反射率的 B10 波段)，并结合数字高程模型等空间辅助信息，对拟选取的 PICS 场进行综合评价 (图 2)。

3 结果与分析

3.1 时空 CV 结果分析

从 2018 年 11 月—2021 年 10 月 B2、B3、B4 和 B8 波段的 CV_{st} 时空分布结果可以看出 (图 3)：各波段具有时空稳定的区域基本一致，其中 $CV_{st} \leq 3\%$ 的区域主要分布在巴丹吉林—腾格里沙漠的西部、北部、以及其边缘与中卫—河西走廊之间的连接处。

从B2到B8随着地表反射率数值的逐渐升高, CV_{st} 低值区的空间分布范围基本保持不变, 但 $CV_{st} > 3\%$ 的高值区域变化明显, 其中位于巴丹吉林沙漠腹地, 以及额济纳、民勤、吴忠和乌海沙漠绿洲等地的 CV_{st} 在逐渐升高, 且数值变化较大。由此可见, 研究区 CV_{st} 具有时空稳定性的区域主要位于巴丹吉林—腾格里沙漠周围, 以及沙漠边缘与周边绿洲之间的连接处, 而巴丹吉林和腾格里沙漠腹地的时空异质性较大, CV_{st} 数值普遍较高。

通过对B2到B8波段的 CV_{st} 面积统计结果可以看出(图4): 除B2波段外, B3、B4和B8波段具有时空稳定性的区域面积基本保持稳定, 分别为 $3.20E+5 \text{ km}^2$ 、 $3.21E+5 \text{ km}^2$ 和 $3.29E+5 \text{ km}^2$, 分别占研究区总面积的 67.39%、67.51% 和 68.49%。与此同时, 由于B2波段地表反射率数值较低, 微弱的数值变化都会对 CV_{st} 计算产生影响, 因此导致B2波段的时空稳定性区域面积统计结果相对较低, 为 $2.25E+5 \text{ km}^2$, 占研究区总面积比例的 56.13%。

以上结果表明, 研究区各波段 CV_{st} 结果具有相似的时空分布特征, 其中 $CV_{st} \leq 3\%$, 且具有时空稳定性的区域占研究区总面积比例的一半以上, 具备选取辐射准不变场的条件和潜力。

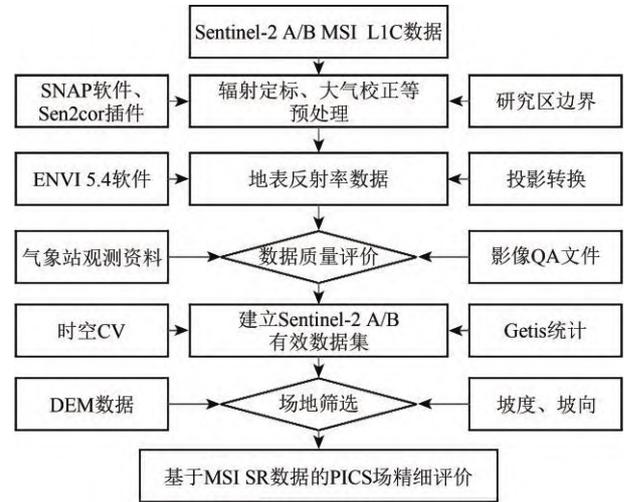


图2 技术路线图

Fig. 2 Technical flow chart

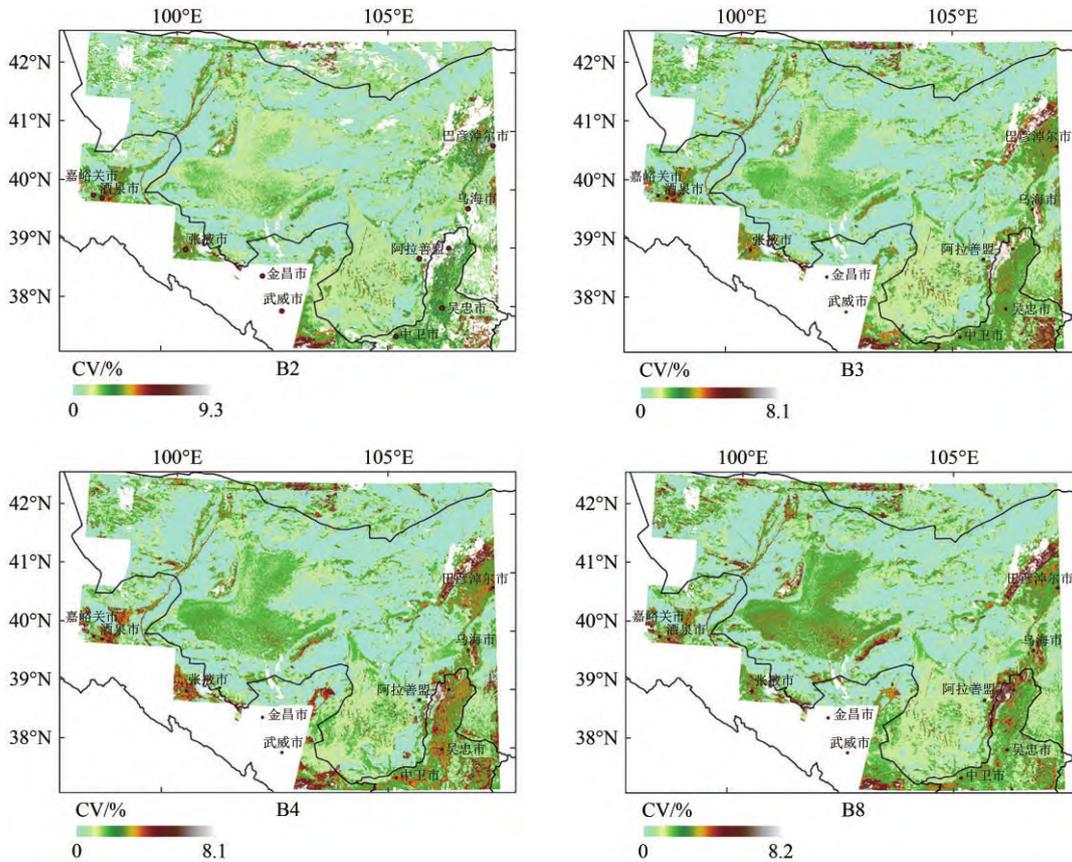
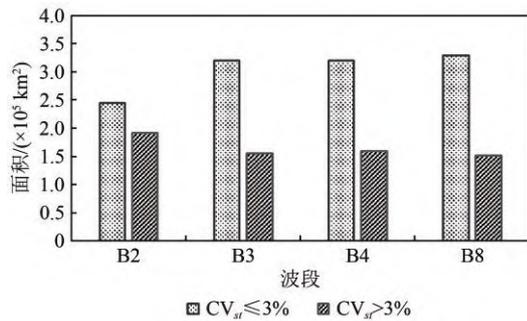


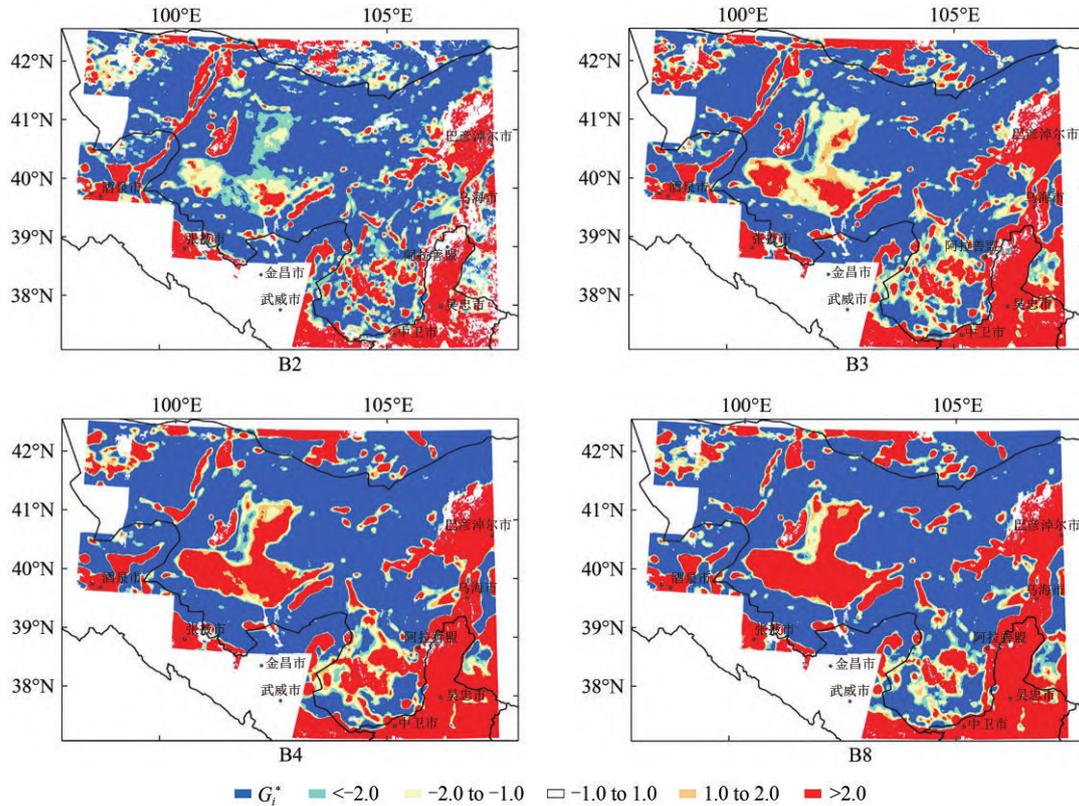
图3 2018年11月—2021年10月B2、B3、B4、B8波段的平均时空 CV_{st} 空间分布

Fig. 3 Average spatial distribution of temporal CV_{st} in bands B2, B3, B4, and B8 from November 2018 to October 2021

图4 不同波段的 CV_{si} 面积统计结果Fig. 4 Area statistics results of CV_{si} for different bands

3.2 Getis-Ord G_i^* 统计结果分析

根据2018年11月—2021年10月B2、B3、B4和B8波段的 G_i^* 指数统计结果可以看出(图5):各

图5 2018年11月—2021年10月B2、B3、B4、B8波段的 G_i^* 指数统计的空间分布Fig. 5 Spatial distribution of G_i^* statistics for bands B2, B3, B4, and B8 from November 2018 to October 2021

从B2到B8各波段 G_i^* 指数的面积统计结果可以看出(图6):随着地表反射率数值的逐渐升高,各波段 $G_i^* < -2.0$,且具有显著一致性的空间低值聚集区面积基本保持稳定,且略有增加,分别为 $1.554\text{E}+5 \text{ km}^2$ 、 $1.781\text{E}+5 \text{ km}^2$ 、 $1.878\text{E}+5 \text{ km}^2$ 和 $1.883\text{E}+5 \text{ km}^2$;而 $G_i^* > 2.0$ 的显著高值聚集区面积在缓慢增加,各波段面积分别为 $0.61\text{E}+5 \text{ km}^2$ 、 $0.86\text{E}+5 \text{ km}^2$ 、 $1.02\text{E}+5 \text{ km}^2$ 和 $1.04\text{E}+5 \text{ km}^2$;与此同

波段具有空间一致性的分布区域基本相同,同时 G_i^* 低值聚集区与 $CV_{si} \leq 3\%$ 的空间分布结果也较为相似。其中, $G_i^* < -2.0$,且具有显著一致性的低值聚集区域主要分布在巴丹吉林—腾格里沙漠的西北部、北部、东北部,以及沙漠边缘与民勤、中卫和河西走廊之间的连接处; $G_i^* > 2.0$,且具有显著性的高值聚集区则主要分布巴丹吉林和腾格里两大沙漠的腹地,以及黑河下游的内蒙额济纳、石羊河下游甘肃民勤、宁夏吴忠到内蒙乌海沙漠绿洲区域。 $-1.0 < G_i^* < 1.0$ 的聚集区主要位在两大沙漠腹地,且从B2到B8随着平均地表反射率数值的逐渐升高,该聚集区面积在逐渐减少,并逐步向高值聚集区转变。

时, $-1.0 < G_i^* < 1.0$ 的空间聚集区面积在逐渐减少,并逐步向高值聚集区转变。

3.3 气溶胶与降水特征分析结果

利用场地评价同期的Sentinel-2气溶胶数据AOT (Aerosol Optical Thickness),以及近30年(1991年—2021年)研究区内气象台站记录的降水量资料,通过分析气溶胶含量和降水量的月变化,

结果表明：研究区逐月的 AOT 含量较低，数值区间变化微弱，在 0.15—0.17 之间，月均值为 0.16。在 3—4 月虽受沙尘等天气因素影响，导致 AOT 含量的极值变程较大，但其均值和中位数变化幅度微弱，与其他月份的数值较为接近，且 AOT 含量保持稳定（图 7）。与此同时，研究区内降水主要出现在 7—8 月份，分别为 12.17 mm 和 13.15 mm，其他月份的累计降水量均小于 10 mm，其中 11 月到次年 2 月份，降水量不足 1 mm。近 30 年历史同期的月降水量变异系数较低，数值变化范围在 1.09%—1.74% 之间，月均值为 1.45%。在全年中，虽然 7—8 月份的累计降水量相对较高，但其历史同期降水量的变异系数是所有月份中最低的，仅为 1.09% 和 1.21%，其月降水量变化具有较高的时空稳定性（图 8）。由此可见，研究区降水量少，气溶胶含量低，其月变化不明显，且具有较高的时空稳定性。研究结果与前期该区域大气特征研究结论相一致（苏俊礼等，2016；何灵莉，2020）。因此，本研究区的大气环境具备选取辐射准不变场的条件。

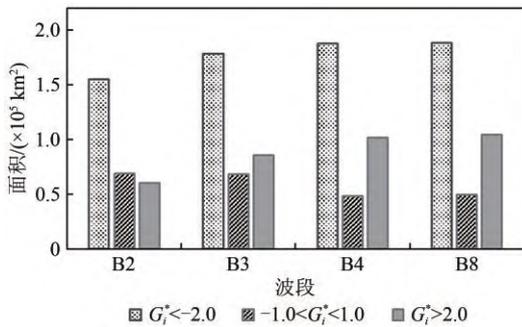


图 6 不同波段的 G_i^* 指数面积统计结果
Fig. 6 Area statistics results of G_i^* for different bands

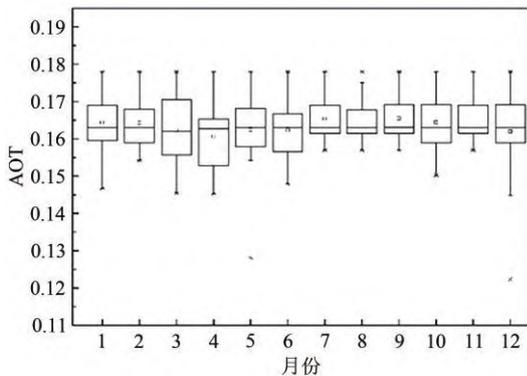


图 7 基于 2018 年 11 月—2021 年 10 月 Sentinel-2 数据统计的逐月 AOT 含量变化情况
Fig. 7 Results of monthly changes in AOT content based on Sentinel-2 data statistics from November 2018 to October 2021

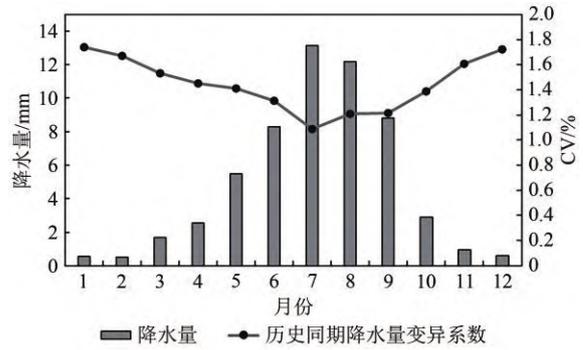


图 8 基于台站资料的研究区逐月累计降水量和历史同期降水量变异系数
Fig. 8 Coefficients of variation of cumulative monthly precipitation and historical contemporaneous precipitation in the study area based on meteorological stations data

3.4 场地选取与特征分析结果

通过选取 $CV_{st} \leq 3\%$ 且 $G_i^* < -2.0$ 的空间统计结果，获取研究区同时具有时空稳定性和空间一致性的区域范围。在此基础上，综合考虑空间代表性、交通便利性等因素，筛选出地表均一、云雨和沙尘天气少，且面积较大（约 20 km）的辐射准不变场 16 个（图 9）。

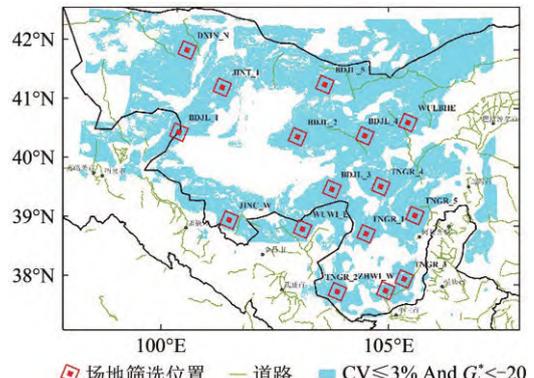


图 9 研究区辐射准不变场空间分布图
Fig. 9 Spatial distribution of PICS in study area

利用 Sentinel-2 A/B MSI 时间序列数据集中所有波段的地表反射率产品，结合数字高程模型等空间辅助信息，对选取的 16 个 PICS 进行综合评价和排序。结果表明：所有场地的平均时空变异系数 $CV_{SR_{b1-12_{avg}}}$ 为 1.59%，数值介于 1.18%—2.11% 之间，其中 TNGR_3 场地（38.13°N，105.35°E）的平均时空 $CV_{SR_{b1-12_{avg}}}$ 数值最低，为 1.18%，平均地表反射率为 0.24；DXIN_N 场地（41.95°N，100.29°E）的平均时空 $CV_{SR_{b1-12_{avg}}}$ 数值最高，为 2.11%（表 3）。总体而言，腾格里沙漠周围 TNGR_3、TNGR_5、

WULBHE、TNGR_1这4个场地, 以及巴丹吉林沙漠西北部JINT_1、BDJL_5, 以及东南部WUWI_E

这3个场地的 $CV_{SR_{b1-12_{avg}}}$ 数值较低, 云雨和沙尘天气少, 反射率高, 且具有较好的时空稳定性。

表3 研究区选取的16个辐射准不变场综合评价与排序结果

Table 3 Comprehensive evaluation and ranking results of the 16 PICS selected in the study area

排序	场地名称	$CV_{SR_{b1-12_{avg}}}/\%$	平均地表反射率	平均海拔/m	平均坡度/ $^{\circ}$	主要分布坡向/ $^{\circ}$	中心经纬度	等效半径/km
1	TNGR_3	1.18	0.24	1480.23	5.62	319.76	38.13°N, 105.35°E	19.72
2	TNGR_5	1.19	0.25	1324.31	4.35	191.31	39.21°N, 105.60°E	19.34
3	WULBHE	1.26	0.33	1221.27	6.48	104.04	40.80°N, 105.45°E	18.93
4	TNGR_1	1.29	0.28	1361.78	1.05	180.00	38.90°N, 104.50°E	20.00
5	JINT_1	1.36	0.28	965.64	3.72	171.87	41.34°N, 101.14°E	17.44
6	WUWI_E	1.43	0.26	1337.15	2.00	225.00	38.97°N, 103.07°E	18.71
7	BDJL_5	1.47	0.28	875.75	4.02	45.00	41.44°N, 103.53°E	19.53
8	ZHWI_W	1.51	0.29	1462.91	1.18	161.57	37.93°N, 104.94°E	17.50
9	BDJL_3	1.62	0.30	1346.22	1.53	329.04	39.65°N, 103.72°E	20.00
10	BDJL_2	1.74	0.21	1309.57	1.86	254.74	40.54°N, 102.92°E	20.00
11	TNGR_4	1.77	0.30	1332.44	5.65	158.20	39.71°N, 104.83°E	18.42
12	BDJL_1	1.82	0.21	1116.50	6.68	64.44	40.55°N, 100.18°E	17.30
13	TNGR_2	1.83	0.27	1544.92	4.33	246.80	37.91°N, 103.87°E	17.36
14	BDJL_4	1.95	0.30	1345.48	2.68	198.44	40.57°N, 104.46°E	19.75
15	JINC_W	1.97	0.34	1507.00	1.66	180.00	39.09°N, 101.42°E	18.64
16	DXIN_N	2.11	0.25	955.31	2.38	90.00	41.95°N, 100.29°E	20.00

利用16个场地各波段的 CV_{sr} 评价结果, 分析每个场地的适用性, 结果表明: B1-B2、B3、B4、B5、B6、B7、B8、B8A、B9和B11-B12波段 CV_{sr} 数值最低的场地分别是JINT_1, WULBHE、BDJL_5、TNGR_1、TNGR_3、WUWI_E、TNGR_5、TNGR_1、JINT_1和TNGR_3(图10)。由此可见, 不同场地对各波段的时空稳定性和适用性也表现出较大的差异。总体而言, 腾格里沙漠周围TNGR_3、TNGR_5、WULBHE、TNGR_1这4个场地, 以及巴丹吉林沙漠西北部JINT_1、BDJL_5, 以及东南部WUWI_E这3个场地的 $CV_{SR_{b1-12_{avg}}}$ 数值较低, 云雨和沙尘天气少, 反射率高, 且具有较好的时空稳定性。

通过分析16个PICS在不同季节的时空CV变化情况, 结果表明(图11): 在每年6—8月夏季, PICS的CV数值变化最小, 所有场地的平均CV为1.59%, 其中TNGR_3和TNGR_5场地的CV数值相对较低, 分别为1.14%和1.19%, DXIN_N场地的CV数值相对较高, 为1.88%。在每年12月到次年2月冬季, 所有场地的平均CV数值达到最大, 为1.84%, 其中JINT_1、WULBHE和TNGR_1场地的CV数值较低, 分别为1.28%、1.29%和1.32%,

JINC_W、DXIN_N和BDJL_4场地的CV数值较高, 分别达到1.85%、1.88%和1.89%; 在春秋两个季节, 所有场地的平均CV数值较为接近, 分别为1.19%和1.17%, 其中TNGR_3、TNGR_5和TNGR_1场地的平均CV数值较低, 分别为1.19%、1.20%和1.21%。总体而言, 16个辐射准不变场在不同季节均表现出较好的时空稳定性, CV数值均低于2.11%, 其中TNGR_3和TNGR_5两个场地的全年CV数值均低于1.19%, 相对具有更好的时空稳定性和空间一致性且更加适合开展全年多季节、多场次星地同步观测试验。

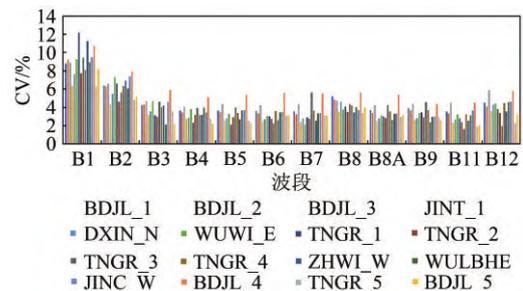


图10 16个场地各波段的 CV_{sr} 结果比较

Fig. 10 Comparison of CV_{sr} results for each band based on 16 PICS

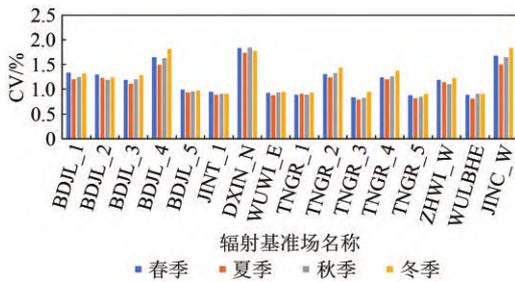


图 11 研究区辐射准不变场在不同季节时空 CV 变化情况
Fig. 11 Spatial and temporal CV variation of PICS in the study area during different seasons

3.5 讨论

以上结果可以看出, 研究区 $CV_{st} \leq 3\%$ 的时空稳定区域主要分布在巴丹吉林—腾格里沙漠的西部、北部、以及沙漠南部边缘与中卫、河西走廊之间的连接地带, 而巴丹吉林和腾格里两大沙漠腹地的 CV_{st} 数值较高, 时空稳定性较差。与此同时, 由于 B2 波段地表反射率数值较低, 微弱的数值变化都会对 CV_{st} 计算产生影响, 因此导致 B2 波段计算出的时空稳定性区域面积低于其他波段的统计结果, 这与何灵莉 (2020) 的研究结果一致。虽然时空变异系数 CV_{st} 可以从时间和空间两个维度评价研究区的稳定情况, 但该系数不仅受变量值离散程度的影响, 而且还受变量值平均值大小的影响, 因此当地表反射率越低时, 微小的扰动也会对变异系数产生巨大的影响, 造成评价结果精确度不足。通过选取每个场地等效半径为 20 km 的区域, 对比本研究选场方法与只用单一变异系数指标评价结果可以看出, 采用单一变异系数法计算的 $CV'_{SR_{b1-12_avg}}$ 数值介于 2.62%—3.62% 之间, 平均数值为 3.17%, 而综合指标法的 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 数值介于 1.18%—2.11%, 所有场地的平均数值为 1.59%, 可将 16 个场地平均 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 数值整体由 3.17% 降到了 1.59% (表 4)。由此可见, 当采用单一空间变异系数法进行场地时空稳定性评价时, 区内零散或破碎的异常值会对评价结果产生巨大的影响, 从而会导致可见光—短波红外载荷的辐射定标工作出现偏差。本研究通过 Getis-Ord G_i^* 空间聚类评价方法与时空 CV 评价指标相结合的方式, 从时空稳定性和空间一致性两个方面进行综合评价, 有效弥补了使用单一 CV 指标引起空间局部评价结果较为离散, 空间区域面积较为破碎的问题。因此, 通过本研究改进的场地筛选方法, 以及选取的可用于

辐射定标的沙漠区域和场地位置具有更好的稳定性和参考价值。与此同时, 本研究也是对 Bannari 等 (2004) 在北美干盐湖床建立的场地选取方法和应用范围做了进一步丰富和扩展。

表 4 综合指标法和单一指标法在每个 PICS 场地的评价结果对比

Table 4 Comparison of the evaluation results of the integrated index method and the single index method at PICS

序号	PICS	单一指标法	综合指标法
		$CV'_{SR_{b1-12_avg}} / \%$	$CV_{SR_{b1-12_avg}} / \%$
1	TNGR_3	2.62	1.18
2	TNGR_5	2.85	1.19
3	WULBHE	2.86	1.26
4	TNGR_1	2.87	1.29
5	JINT_1	2.91	1.36
6	WUWI_E	3.00	1.43
7	BDJL_5	3.01	1.47
8	ZHWI_W	3.13	1.51
9	BDJL_3	3.22	1.62
10	BDJL_2	3.30	1.74
11	TNGR_4	3.33	1.77
12	BDJL_1	3.42	1.82
13	TNGR_2	3.54	1.83
14	BDJL_4	3.59	1.95
15	JINC_W	3.60	1.97
16	DXIN_N	3.62	2.11
17	场地平均值	3.17	1.59

本研究选取的 16 个辐射准不变场平均时空变异系数 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 为 1.59%, 数值介于 1.18%—2.11% 之间 (表 3)。利用同时期 Sentinel-2 A/B MSI 数据计算敦煌 (Dunhuang) 定标场 (40.15°N, 94.335°E) 的平均时空变异系数 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 为 1.21%。通过进一步对比 TNGR_3、TNGR_5 和 Dunhuang 场地各波段的 CV_{SR} 发现, 3 个场地在 B1 和 B2 波段的 CV_{SR} 数值较高, 其中 Dunhuang 场地的 CV_{SR} 最高, 分别达到 10.26% 和 8.84%。3 个场地在 B3—B12 波段 CV_{SR} 数值相对较低, 且数值较为接近。由此可见, 3 个场的时空稳定性均会受到 B1 波段和 B2 波段的影响, 但 Dunhuang 场地的时空稳定性更易受到来自 B1、B2 波段等低反射率数值频繁波动的影响, 最终导致其 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 结果低于 TNGR_3 和 TNGR_5 这两个场地的 (图 12)。因此, 本研究选取的 TNGR_3 和 TNGR_5 场地具有更好的时空稳定性, 且优于国际同类场地的评价结果。

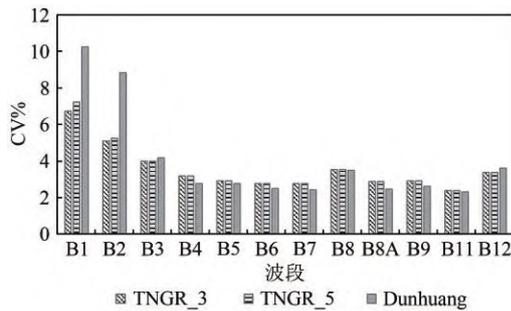


图12 TNGR_3、TNGR_5和Dunhuang场地13个波段的 CV_{SR} 结果比较

Fig. 12 Comparison of CV_{SR} results in 13 bands at TNGR_3, TNGR_5 and Dunhuang sites

通过分析同时期 Sentinel-2 A/B MSI 数据的 QA 文件发现, 本研究提取 16 个场地共计地表反射率样本数为 3610 个, 其中含云雨或沙尘像素的样本数为 652 个, 仅占总样本数的 18.06%, 全年平均无云天数接近 300 d。而 Dunhuang 场地共计提取地表反射率样本数为 231 个, 其中含云雨或沙尘像素的样本数为 97 个, 占总样本数的 41.99%, 全年平均无云天数为 210 d。由此可见, 天气是引起辐射定标场时空稳定性趋势出现异常的重要因素, 在选取场地时, 应充分考虑天气气候条件因素, 同时该结论与 Khadka 等 (2021) 研究结果相一致。

与此同时, 由于地表空间的复杂性, 在某一尺度上总结出的结果或规律, 应用在另一空间尺度上可能是有效和相似的, 但更需要发现差异和去修正 (李小文和王祎婷, 2013; 刘良云, 2014)。本研究利用所有场地中心区的 Sentinel-2 A/B MSI 数据, 对比每个波段在原空间分辨率 (10 m、20 m 和 60 m) 的地表反射率数值, 以及将其空间聚合至气象卫星空间分辨率 (250 m 和 500 m) 的平均地表反射率数值。可以看出, 在满足相同区域、时间和成像等条件下, 随着空间尺度升高和分辨率降低, 相同波段的地表反射率数值也随之降低 (图 13)。同一区域采用相同方法计算出来的不同空间尺度数据也会存在差异, 其中原空间尺度所有波段的地表反射率数值介于 0.14—0.33 之间, 累计标准差分别为 1.14; 当升尺度到 250 m 和 500 m 时, 两种空间尺度的地表反射率数值分别介于 0.13—0.31 和 0.12—0.29 之间, 累计标准差分别为 1.39 和 1.52 (图 14)。因此, 在利用本研究所选场地开展历史气象卫星数据再定标研究之前, 需要定量分析空间尺度效应的影响, 并加以修正。但

鉴于本研究目标和内容, 上述工作将是我们未来要开展的研究方向之一。

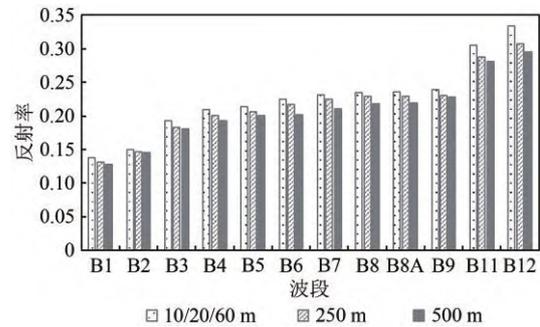


图13 不同空间尺度下的 Sentinel-2 各波段地表反射率数值
Fig. 13 Surface reflectance values of Sentinel-2 at different spatial scales for each spectral band

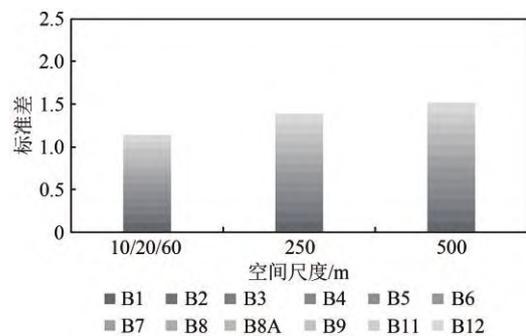


图14 不同空间尺度地表反射率数值的累计标准差
Fig. 14 Cumulative standard deviation of surface reflectance values at different spatial scales

综上所述, 位于内蒙古自治区和甘肃境内的巴丹吉林—腾格里两大沙漠时空稳定性区域不仅具有气候干旱, 空间面积大、时空稳定性好、地表均一、大气干洁, 气溶胶和水汽含量低等特点, 而且具备开展高频次、长历时卫星数据再定标工作的外场条件。然而, 本研究仍存在研究数据时间序列短、使用数据源单一等问题, 研究结果还有待更长时间序列, 多源遥感和其他观测数据加以验证和完善。

4 结 论

本研究利用 2018 年 11 月—2021 年 10 月覆盖整个研究的 Sentinel-2 A/B MSI 时间序列遥感数据集, 结合时空 CV 评价指标和 $Getis-Ord G_i^*$ 空间聚类方法, 从时空稳定性和空间一致性两个方面对研究区进行综合评价, 筛选和评价可用于历史气象卫星数据进行辐射定标的场地, 得出如下结论:

(1) 研究区具有时空稳定性和空间均一性的

区域主要分布在巴丹吉林—腾格里沙漠的西部、北部、以及沙漠南部边缘与中卫、河西走廊之间的连接地带，而巴丹吉林和腾格里两大沙漠腹地的 CV_{st} 数值较高，时空稳定性较差。除B2波段外，其他波段 $CV_{st} \leq 3\%$ 的结果具有相似的时空分布特征，且区域面积基本保持一致。

(2) 通过 *Getis-Ord G_i^** 空间聚类方法与时空 CV 指标组合选取场地的方法，可进一步降低单一指标评价结果的不确定性，提高场地选取的精度。本研究选取 16 个场地的平均时空变异系数 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 为 1.59%， $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 数值介于 1.18%—2.11% 之间，场地具有空间面积大、时空稳定性好、地表均一、大气干洁，云雨和沙尘天气少等特点，为开展历史气象卫星数据再定标研究提供了更丰富亮度的准不变定标场地。

(3) TNGR_1 和 TNGR_3 场地的时空 $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ 分别为 1.18% 和 1.19%。在不同季节的 CV 数值均低于 Dunhuang 场，且全年平均无云或沙尘天数接近 300 d，因此这两个场地更加适合开展高频次、长历时卫星辐射数据再定标工作。

志 谢 文中使用的 Sentinel-2 A/B MSI 数据来源于欧空局 Sentinel Online 网站 (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>)，在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Bacour C, Briottet X, Bréon F M, Viallefont-Robinet F and Bouvet M. 2019. Revisiting pseudo invariant calibration sites (PICS) over sand deserts for vicarious calibration of optical imagers at 20 km and 100 km scales. *Remote Sensing*, 11(10): 1166 [DOI: 10.3390/rs11101166]
- Bannari A A B, Omari K, Teillet P M and Fedosejevs G. 2004. Multi-sensor and multiscale survey and characterization for radiometric spatial uniformity and temporal stability of Railroad Valley Playa (Nevada) test site used for optical sensor calibration//Proceedings Volume 5234, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII. Barcelona: SPIE: 590-604 [DOI: 10.1117/12.506864]
- Cosnefroy H, Leroy M and Briottet X. 1996. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 58(1): 101-114 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00211-1]
- Gong H, Tian G L, Yu T, Gu X F, Gao H L and Li X Y. 2010. Vicarious radiometric calibration and validation of CBERS02B CCD data. *Journal of Remote Sensing*, 14(1): 1-12 (巩慧, 田国良, 余涛, 顾行发, 高海亮, 李小英. 2010. CBERS02B 卫星 CCD 相机在轨辐射定标与真实性检验. 遥感学报, 14(1): 1-12 [DOI: 10.11834/jrs.20100101])
- Gu X F, Tian G L, Yu T, Li X Y, Gao H L and Xie Y. 2013. Radiation Calibration of the Space-Based Optical Satellite Sensor: Principle and Method. Beijing: Science Press: 5-24 (顾行发, 田国良, 余涛, 李小英, 高海亮, 谢勇. 2013. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法. 北京: 科学出版社: 5-24)
- Han Q J, Zhang X W, Qiao Z Y, Yang L, Pan Z Q and Liu L. 2015. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites. *Infrared and Laser Engineering*, 44(1): 127-133 (韩启金, 张学文, 乔志远, 杨磊, 潘志强, 刘李. 2015. 高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标. 红外与激光工程, 44(1): 127-133) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2015.01.023]
- He L L. 2020. Selection, Evaluation and Radiometric Calibration Application of Pseudo-Invariant Calibration Sites (PICS) in Northwest China. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences: 11-20 (何灵莉. 2020. 我国西北准不变定标场(PICS)的选取评价和辐射定标应用. 北京: 中国气象科学研究院: 11-20) [DOI: 10.27631/d.cnki.gzqky.2020.000014]
- Helder D L, Basnet B and Morstad D L. 2010. Optimized identification of worldwide radiometric pseudo-invariant calibration sites. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(5): 527-539 [DOI: 10.5589/m10-085]
- Hu X Q, Liu J J, Qiu K M, Fan T X, Zhang Y X, Rong Z G and Zhang L J. 2009. New method study of sites vicarious calibration for SZ-3/CMODIS. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 29(5): 1153-1159 (胡秀清, 刘京晶, 邱康睦, 范天锡, 张玉香, 戎志国, 张立军. 2009. 神舟 3 号飞船中分辨率成像光谱仪场地替代定标新方法研究. 光谱学与光谱分析, 29(5): 1153-1159) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)05-1153-04]
- Hu X Q, Rong Z G, Qiu K M, Zhang Y X, Zhang G S and Huang Y B. 2002. In-flight radiometric calibration for thermal channels of fy-1c meteorological satellite sensors using Qinghai lake, water surface radiometric calibration site. *Journal of Remote Sensing*, 6(5): 328-333 (胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 张玉香, 张广顺, 黄意芬. 2002. 利用青海湖水面辐射校正场对 FY-1C 气象卫星热红外传感器进行绝对辐射定标. 遥感学报, 6(5): 328-333) [DOI: 10.11834/jrs.20020502]
- Hu X Q, Sun L, Liu J J, Ding L, Wang X H, Li Y, Zhang Y, Xu N and Chen L. 2012. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4915-4928 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2214226]
- Khadka N, Teixeira Pinto C and Leigh L. 2021. Detection of change points in pseudo-invariant calibration sites time series using multi-sensor satellite imagery. *Remote Sensing*, 13(11): 2079 [DOI: 10.3390/rs13112079]
- Li W Y, Lü S H, Dong Z B, Fan G Z and Chen L H. 2015. Spatial and

- temporal variation of precipitation over areas surrounding the Badain Jaran desert. *Journal of Desert Research*, 35(1): 94-105 (李万元, 吕世华, 董治宝, 范广州, 陈雷华). 2015. 巴丹吉林沙漠周边地区降水量的时空变化特征. *中国沙漠*, 35(1): 94-105 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2014.00064]
- Li X W and Wang Y T. 2013. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1163-1169 (李小文, 王祎婷). 2013. 定量遥感尺度效应刍议. *地理学报*, 68(9): 1163-1169 [DOI: 10.11821/dlxb201309001]
- Liang S L, Tang S H, Zhang J, Xu B, Cheng J, Cheng X, Gong P, Jia K, Jiang B, Li A N, Liu S H, Qiu H, Xiao Z Q, Xie X H, Yang J, Yang J G, Yao Y J, Yu G R, Zhang X T and Zhao X. 2016. Production of the global climate data records and applications to climate change studies. *Journal of Remote Sensing*, 20(6): 1491-1499 (梁顺林, 唐世浩, 张杰, 徐冰, 程洁, 程晓, 宫鹏, 贾坤, 江波, 李爱农, 刘素红, 邱红, 肖志强, 谢先红, 杨军, 杨俊刚, 姚云军, 于贵瑞, 张晓通, 赵祥). 2016. 全球气候数据集生成及气候变化应用研究. *遥感学报*, 20(6): 1491-1499 [DOI: 10.11834/jrs.20166359]
- Liu L Y. 2014. Simulation and correction of spatiascaling effects for leaf area index. *Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1158-1168 (刘良云). 2014. 叶面积指数遥感尺度效应与尺度纠正. *遥感学报*, 18(6): 1158-1168 [DOI: 10.11834/jrs.20144103]
- Lu N M, Ding L, Zheng X B, Ye X, Li C R, Lü D R, Zhang P, Hu X Q, Zhou C H, You Z, Fang J C, Gong J Y, Jiang X W, Li J J, Ma L L and Xu N. 2020. Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 24(6): 672-680 (卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜). 2020. 中国空间辐射测量基准技术. *遥感学报*, 24(6): 672-680 [DOI: 10.11834/jrs.20200011]
- Lu N M and Gu S Y. 2016. Review and prospect on the development of meteorological satellites. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 832-841 (卢乃锰, 谷松岩). 2016. 气象卫星发展回顾与展望. *遥感学报*, 20(5): 832-841 [DOI: 10.11834/jrs320166194]
- Ma N, Wang N A, Zhu J F, Chen X L, Chen H B and Dong C Y. 2011. Climate change around the Badain Jaran desert in recent 50 years. *Journal of Desert Research*, 31(6): 1541-1547 (马宁, 王乃昂, 朱金峰, 陈秀莲, 陈红宝, 董春雨). 2011. 巴丹吉林沙漠周边地区近50a来气候变化特征. *中国沙漠*, 31(6): 1541-1547
- Mitchell R M, O'Brien D M, Edwards M, Elsum C C and Graetz R D. 1997. Selection and initial characterization of a bright calibration site in the Strzelecki desert, South Australia. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23(4): 342-353 [DOI: 10.1080/07038992.1997.10855220]
- Odongo V O, Hamm N A S and Milton E J. 2014. Spatio-temporal assessment of Tuz Gölü, Turkey as a potential radiometric vicarious calibration site. *Remote Sensing*, 6(3): 2494-2513 [DOI: 10.3390/rs6032494]
- Ohring G, Tansock J, Emery W, Butler J, Flynn L, Weng F Z, St Germain K, Wielicki B, Cao C Y, Goldberg M, Xiong J, Fraser G, Kunkee D, Winker D, Miller L, Ungar S, Tobin D, Anderson J G, Pollock D, Shipley S, Thurgood A, Kopp G, Ardanuy P and Stone T. 2007. Achieving satellite instrument calibration for climate change. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 88(11): 136 [DOI: 10.1029/2007EO110015]
- Rondeaux G, Steven M D, Clark J A and Mackay G. 1998. La Crau: a European test site for remote sensing validation. *International Journal of Remote Sensing*, 19(14): 2775-2788 [DOI: 10.1080/014311698214505]
- Smith D L, Mutlow C T and Rao C R N. 2002. Calibration monitoring of the visible and near-infrared channels of the Along-Track Scanning Radiometer-2 by use of stable terrestrial sites. *Applied Optics*, 41(3): 515-523 [DOI: 10.1364/AO.41.000515]
- Su J L, Wang J H, Li J P, Shang K Z, Kang Y Z, Jia X W and Wu Z X. 2016. Preliminary analysis of precipitation characteristics in the Badain Jaran and Tengger deserts. *Journal of Arid Meteorology*, 34(2): 261-268 (苏俊礼, 汪结华, 李江萍, 尚可政, 康延臻, 贾旭伟, 邬仲勋). 2016. 巴丹吉林和腾格里沙漠降水特征初步分析. *干旱气象*, 34(2): 261-268 [DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-02-0261]
- Sun L, Hu X Q, Guo M H and Xu N. 2013. Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 3(4): 84-96 (孙凌, 胡秀清, 郭茂华, 徐娜). 2013. 风云三号A星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段的多场地定标跟踪. *气象科技进展*, 3(4): 84-96 [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.009]
- Tian Q J, Zheng L F and Tong Q X. 1998. Comparison and analysis for in-flight calibration of SPOT based on methods of test site and on-boarding calibration. *Journal of Remote Sensing*, 2(1): 13-18 (田庆久, 郑兰芬, 童庆禧). 1998. SPOT地面场定标与星上定标结果的比较分析. *遥感学报*, 2(1): 13-18 [DOI: 10.11834/jrs.19980103]
- Wang L, Hu X Q and Chen L. 2017. Wide dynamic nonlinear radiometric calibration of optical satellite sensors using multiple stable earth targets. *Journal of Remote Sensing*, 21(6): 892-906 (王玲, 胡秀清, 陈林). 2017. 多目标的卫星仪器宽动态非线性定标. *遥感学报*, 21(6): 892-906 [DOI: 10.11834/jrs.20176351]
- Zhang K C, Yao Z Y, An Z S and Xie S B. 2012. Wind-blown sand environment and precipitation over the Badain Jaran desert and its adjacent regions. *Journal of Desert Research*, 32(6): 1507-1511 (张克存, 姚正毅, 安志山, 谢胜波). 2012. 巴丹吉林沙漠及其毗邻地区降水特征及风沙环境分析. *中国沙漠*, 32(6): 1507-1511

Selection and evaluation of pseudo-invariant calibration sites in the Badain Jaran and Tengger Desert of China based on Sentinel satellite data

WANG Wei¹, WANG Lijuan², GUO Ni², HU Xiuqing³, WANG Ling³

1. College of Aviation Meteorology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

3. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: The selection of ground sites conforming to the radiometric calibration of long time series remote sensing data is greatly important to establish a unified radiometric calibration reference standard, improve the accuracy of satellite radiometric calibration, and promote the application of quantified products. In this study, Sentinel-2 A/B MSI remote sensing data covering the entire study from November 2018 to October 2021 were used to combine the coefficient of variation (CV) index and the Getis-Ord G_i^* spatial clustering method to comprehensively evaluate the study area in terms of spatial and temporal stability and spatial consistency and to select sites that could be used for radiometric calibration in the visible and short-wave infrared bands of long time series meteorological satellite data. Results showed that: (1) the PICS with spatial and temporal stability and spatial uniformity in the study area are mainly located in the western and northern parts of the Badain Jaran Desert and Tengger Desert, as well as the connection zone between the southern edge of the desert and the Zhongwei and Hexi Corridor of China. (2) This study reduces the uncertainty of site evaluation results by improving the site selection method. The average spatio-temporal coefficient of variation for the 16 sites selected was only 1.59%. (3) The $CV_{SR_{b1-12_avg}}$ of TNGR_1 and TNGR_3 sites in the study area is $\leq 1.19\%$, which is better than the evaluation results of similar international sites. These sites have an average number of cloud-free days close to 300 d throughout the year, with the attributes of large spatial area, good spatial and temporal stability, homogeneous surface, dry and clean atmosphere, and few cloudy and rainy days. Therefore, these sites provide relatively rich brightness quasi-invariant calibration sites for conducting historical meteorological satellite data recalibration studies.

Key words: desert, calibration field, Sentinel-2, spatial clustering, coefficient of variation

Supported by National Key Research and Development Project of China (No. 2018YFB0504901); National Natural Science Foundation of China (No. 41805086, 42105131)