

贺鹏,郑新倩,徐立帅,等.基于结构相似度的巴丹吉林沙漠地表反照率时空分布特征[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(1):111-118.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.01.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于结构相似度的巴丹吉林沙漠地表反照率时空分布特征

贺 鹏¹,郑新倩²,徐立帅¹,杨 帆³

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 晋中 030801;2.新疆农业气象台,新疆 乌鲁木齐 830002;

3.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:为研究巴丹吉林沙漠地表反照率的变化规律,以 MODIS 黑空短波地表反照率数据为基础,利用结构相似度(SSIM)算法,分析巴丹吉林沙漠地表反照率时空分布特征。结果表明:时间尺度上不同沙丘类型地表反照率结构相似度,受到风、降水、地表温度和海拔高度影响均表现为春季最大,秋、夏季次之,冬季最小,但结构相似度值域和变化幅度存在明显差异。在空间上,沙丘数量和间距是巴丹吉林沙漠地表反照率变化的主要影响因素,沙丘数量较多且间距较小时,SSIM 值偏小,反之则较大。同时沙丘形态简单或相对稳定会减少地表反照率空间差异性。

关键词:地表反照率;巴丹吉林沙漠;结构相似度;形态参数

中图分类号:P422.15

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)01-0111-08

地表反照率是地球表面反射的太阳辐射总能量与入射的太阳总辐射能量之间的比值^[1],对全球气候变化影响较大,是监测地—气相互作用和能量收支平衡的重要参数^[2-4]。在干旱半干旱地区,地表反照率的变化对区域能量平衡和水热交换具有较大影响,干旱半干旱地区由于缺乏降雨而导致植被较少,地表反照率相对较大,地表获得的净辐射量较小,相应的感热通量和潜热通量较小,造成大气辐射上升减弱,云和降水减少,进而导致该地区的持续干旱。区域地表反照率的突然增加也可促进沙漠的形成^[5-8]。因此,在干旱半干旱地区,尤其在沙漠地区准确获取地表反照率并分析其分布和变化特征,对研究区域气候变化、能量平衡和沙漠成因具有重要意义。

巴丹吉林沙漠地处阿拉善高原中心,位于东亚夏季风的西北缘,属于气候变化的敏感区^[9-10],在全球气候变化的大背景下,研究巴丹吉林沙漠反照率的变化规律,是揭示西北地区东亚夏季风进退的关键所在,对认识东亚乃至全球气候变化和能量循环具有重要意义^[11-13]。但长期以来受到环境恶劣、可进入性差等因素的影响,沙漠腹地地表反照率数据获取难度较大且数据质量不高,常通过沙漠周边外围陆气通量监测站获取地面辐射观测数据及相应气象资料计算地表反照率,以研究整个巴丹吉林沙漠地表反照率时空变化特征^[14-15]。相比实验观测,利用遥感监测手段可较快获得连续分布区域的地表反照率。许多学者基于 NOAA-AVHRR 和 MODIS 数据进行地表反照率时空分布特征的研究,发现在天气尺度上太阳高度角是影响地表反照率变化的主要因素,在长时间尺度上影响地表反照率的因素主要有降水、地表温度、下垫面类型及地表覆盖类型,但在不同地区地表反照率变化趋势存在明显差异^[16-19]。在遥感反演地表反照率的过程中,某些处理会简化假设,导致信息丢失,同时由于缺乏大范围的地表反

收稿日期:2019-07-09;修回日期:2019-11-05

基金项目:国家自然科学基金(41975010);山西农业大学科技创新基金(2017022);山西农业大学科技创新基金(2016YJ16)

作者简介:贺鹏(1989—),男,讲师,主要研究方向为定量遥感。

E-mail:hepeng7777@126.com

通信作者:杨帆(1987—),男,副研究员,研究方向为陆气相互作用野外观测研究。E-mail: yangfan309@yeah.net

照率实测资料,遥感反演精度验证较为困难。本文以MODIS 黑空短波地表反照率产品为数据源,利用结构相似度(Structural Similarity, SSIM)分析和探讨巴丹吉林沙漠地表反照率时空变化特征。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

巴丹吉林沙漠位于内蒙古自治区西部,东临宗乃山,西至古日乃湖,北达拐子湖,南接合黎山、北大山和雅布赖山(图1)。沙漠总面积为 $5.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,下垫面类型主要包括流动沙地、半流动沙地、半固定沙地和固定沙地,其中流动沙地和半流动沙地分别占到沙漠总面积的 88.5% 和 10.2%。沙漠地势表现为东南高、西北低,东南部沙丘高大密集,西部地势平坦紧邻黑河流域,北部地势最低。气温随季节变化明显,冬季寒冷干燥,夏季高温炎热,降水稀少且多集中于夏季,风向多为西北风,年平均风速为 4 m/s [20]。

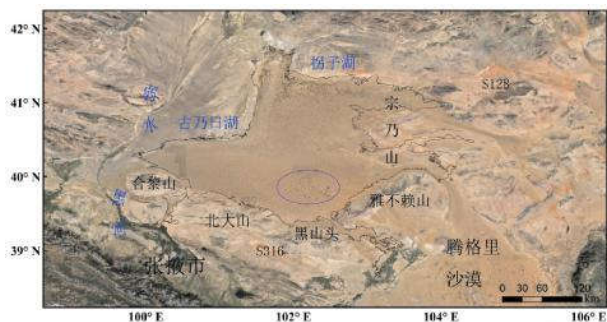


图1 研究区概况

(黑色实线为研究区,蓝色椭圆标注区为湖泊区)

1.2 数据来源与处理

MODIS 地表反照率数据 MCD43A3 (空间分辨率 500 m) 采用 MODLAND 正弦投影,其投影编号 H25V04、H25V05 和 H26V05 区域可覆盖巴丹吉林沙漠,本文在合成 2018 年天气尺度 MCD43A3 地表反照率数据基础上进行投影转换。选择 MCD43A3 地表反照率数据中的黑空短波地表反照率 [21] 作为基础数据,利用谐波分析方法 [22] 重构黑空短波地表反照率数据的时间序列,并合成月尺度黑空短波地表反照率数据。

结构相似度是从图像组成方面来表达结构信息,主要要素包括亮度、对比度和结构度。设 X 、 Y 分别为图像中以某 2 个像元为中心的 3×3 矩阵, X 和 Y 的结构相似度为:

$$S(X, Y) = I(X, Y)^\alpha C(X, Y)^\beta s(X, Y)^\gamma \quad (1)$$

其中,

$$I(X, Y) = (2\mu_X\mu_Y + C_1) / (\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1), \quad (2)$$

$$C(X, Y) = (2\delta_X\delta_Y + C_2) / (\delta_X^2 + \delta_Y^2 + C_2), \quad (3)$$

$$s(X, Y) = (\delta_{XY} + C_3) / (\delta_X\delta_Y + C_3). \quad (4)$$

式中: $I(X, Y)$ 为亮度比较函数, $C(X, Y)$ 为对比度比较函数, $s(X, Y)$ 为结构比较函数, μ_X, μ_Y 为 X 、 Y 子块反照率的均值; δ_X, δ_Y 为 X 、 Y 子块反照率的方差, δ_{XY} 为 X 、 Y 子块反照率的协方差。 α, β, γ 参数,用来调整 3 个比较函数所占比重,取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。 C_1, C_2, C_3 为常量,用于避免分式出现异常情况而引入。将式(2)、(3)、(4)代入(1)简化为:

$$S(X, Y) = (2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\delta_X\delta_Y + C_2) / (\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\delta_X^2 + \delta_Y^2 + C_2). \quad (5)$$

将研究区左上角第 1 行的 3×3 像元矩阵定义为 X 域,向右 1 列 3×3 像元矩阵定义为 Y 域,依次对所有行进行循环,计算 SSIM 值。区域 SSIM 值越高,说明 2 个 3×3 像元矩阵之间的结构差异越小,即地表反照率差异越小。反之则表示地表反照率差异较大。以月尺度黑空短波地表反照率数据为基础,计算巴丹吉林沙漠地表反照率 SSIM 值,并对沙漠地表反照率时空分布特征进行研究和讨论。

2 结果与分析

2.1 地表反照率月际变化

合成 2018 年巴丹吉林沙漠月尺度地表反照率并进行分级,结果如图 2 所示。沙漠地表反照率从 1 月和 2 月开始逐渐减小,并在 7 月出现最小值,8 月开始反照率呈递增趋势,且在 12 月达到峰值。1 和 2 月沙漠地表反照率偏高,分布区间为 0.22~0.3,且反照率空间差异较明显,表现为东南高、西北低。3—7 月,地表反照率呈递减趋势,反照率主要分布区间降至 0.2~0.25,地表反照率空间差异性进一步增强,即东南地区和西北地区地表反照率差异变大,西部黑水下游弱水东岸至古日乃湖现代干涸湖盆之间、北部拐子湖现代干涸盆地地区地表反照率减少速率快于南部北大山和东南部雅布赖山附近区域。8—12 月,沙漠地表反照率逐渐增加并在 12 月出现最大值(0.66),地表反照率空间差异性减弱,其中湖泊分布区、雅布赖山以西和拐子湖以南地区地表反照率增速最快。

2.2 结构相似度时间变化特征

图 3 显示了巴丹吉林沙漠地表反照率结构相似度时间变化特征。1—5 月 SSIM 值总体呈递增趋势,均值由 0.68 增长到 0.86,沙漠地表反照率空间差异性减小。沙漠西北部横向沙丘地区 SSIM 值增加速

度和范围均高于东南部高大沙山地区,到5月拐子湖东南地区和古日乃湖西南部地区 SSIM 值达到最大值,但在宗乃山以西部分地区 4—5 月出现 SSIM 值降低现象。6—8 月 SSIM 值逐步减少,在沙漠腹地 SSIM 值下降最明显,且在东南湖泊区域出现 SSIM 值 <0.2 的区域。进入秋冬后,SSIM 值空间差异增大,具体表现为沙漠腹地低,边缘高。9—12 月沙漠地表反照率 SSIM 值均值由 0.8 减少到 0.71,沙漠腹地 SSIM 值集中分布区间由 0.6~0.8 减少到 0.4~0.6,而边缘则由 0.8~1.0 减少到 0.6~0.8。在 S218 国道西南地区 SSIM 变化不显著,保持在 0.8~1.0。

将巴丹吉林沙漠月尺度结构相似度分为低值分布区间(0~0.2)、中低值分布区间(0.2~0.4)、中值分布区间(0.4~0.6)、中高值分布区间(0.6~0.8)和高值分布区间(0.8~1)(表 1)。不同分布区间随月尺度时间变化呈不同变化趋势,低值分布区间和中低值分布区间像元比例呈先减小后增大趋势,在 5 月达到最小值,同时在 1 月达到最大值且中低值分布区间随时间变化幅度明显大于低值分布区间,说明低值分布区间像元比例受时间变化影响较小。中高值分

布区间和高值分布区间像元比例随时间变化先增大后减小,最大值分别在 8 月和 5 月,最小值在 4 月和 1 月出现,高值分布区间在 1 月和 12 月较其余月份降幅明显。中值分布区间像元比例随时间变化的幅度较大,整体趋势为先减少后增大。

计算巴丹吉林沙漠季节尺度结构相似度并依据表 1 的分类标准,分为低值分布区间(0~0.2)、中低值分布区间(0.2~0.4)、中值分布区间(0.4~0.6)、中高值分布区间(0.6~0.8)和高值分布区间(0.8~1)(表 2)。不同季节各分布区间所占比重差异显著,春季和秋季中高值和高值分布区间像元占有所有像元的比例分别为 97.94%和 96.83%,说明春、秋两季沙漠反照率整体均质性较好,夏季、冬季反照率空间差异性则呈逐渐增大趋势,其中冬季高值分布区间像元仅占有所有像元的 28.95%,空间差异性达到最大。

2.3 结构相似度空间分布特征

计算季节尺度地表反照率结构相似度,结果如图 4 所示。根据沙丘空间分布特点和形态^[23]将巴丹吉林沙漠分为 I、II 和 III 区,其中 I 区位于西部和北部边缘地带,沙丘高度较小,形态简单,以新月形沙

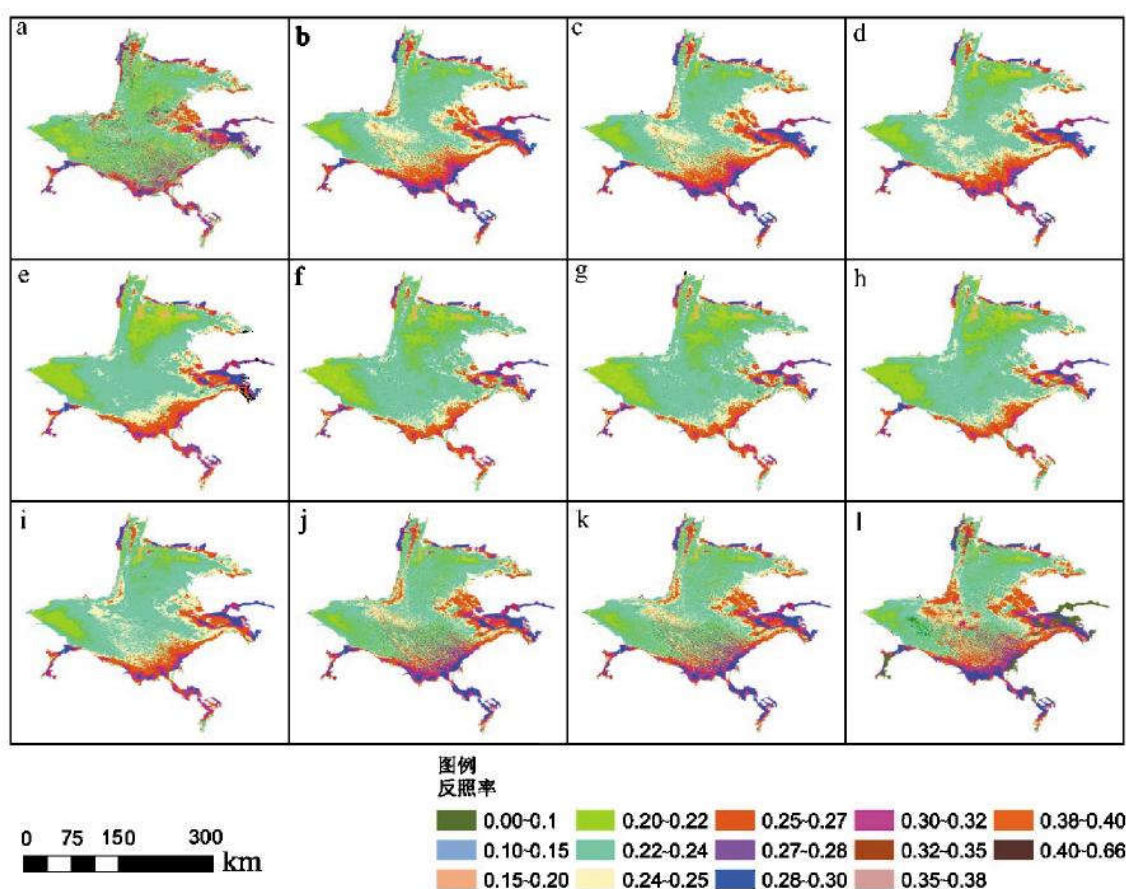


图 2 2018 年巴丹吉林沙漠地表反照率时间变化
(a-l 分别代表 1~12 月)

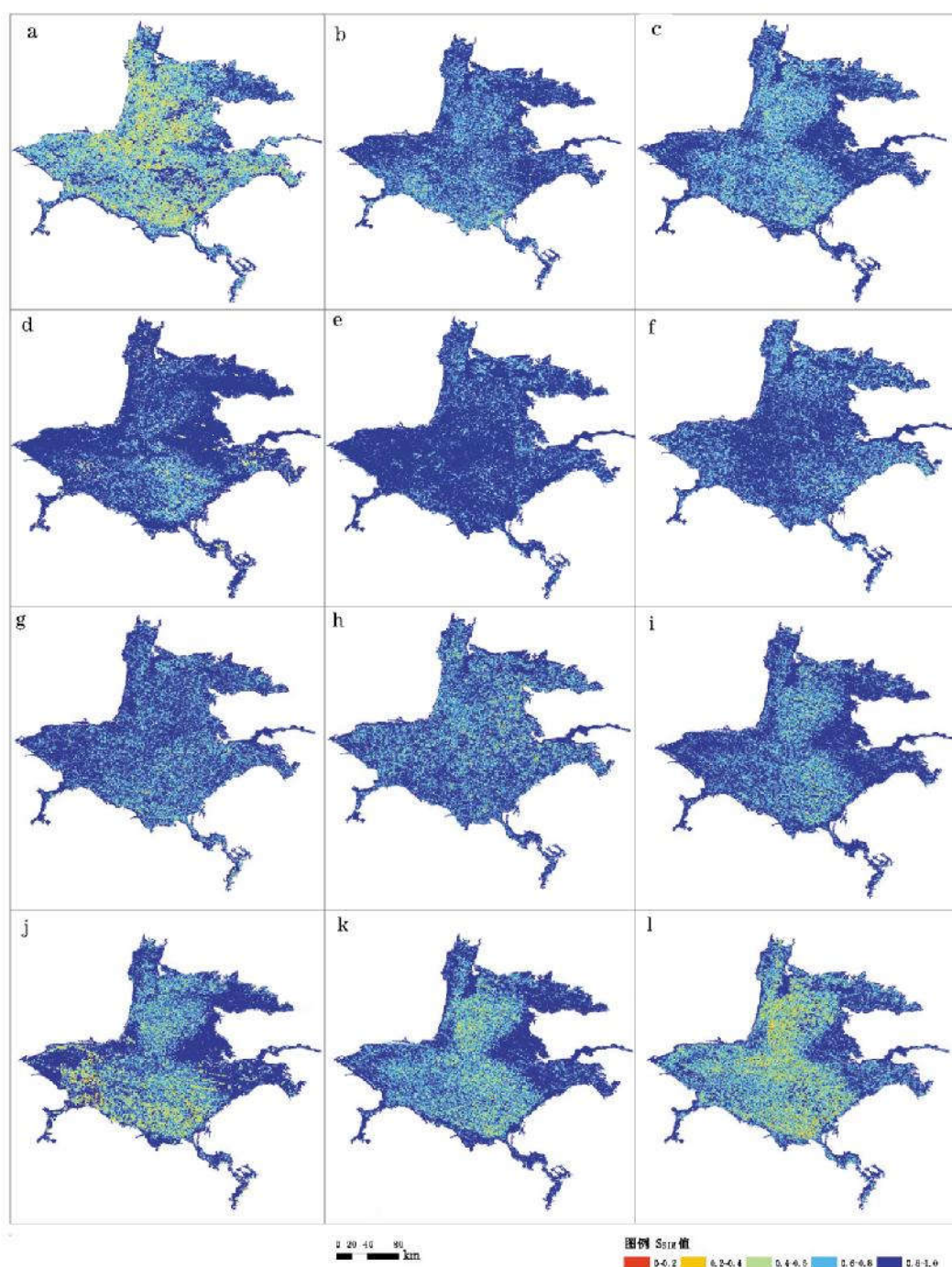


图3 地表反照率结构相似度时间变化特征
(a-l分别代表1-12月)

表1 月尺度结构相似度分级区间像元所占比例/%

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
低值	1.05	0.17	0.13	0.11	0.02	0.08	0.15	0.19	0.13	0.48	0.19	0.82
中低值	10.27	1.82	2.09	1.97	0.48	1.33	1.92	2.82	1.76	5.41	3.01	7.80
中值	26.87	9.33	12.51	7.44	3.96	7.89	10.07	13.00	10.43	18.11	15.68	22.82
中高值	29.87	29.58	31.48	17.09	18.40	27.54	30.43	33.21	28.92	23.08	30.20	31.83
高值	31.94	59.09	53.79	73.39	77.15	63.15	57.43	50.78	58.76	52.92	50.92	36.72

表2 季节尺度结构相似度分级区间像元所占比例 %

	春季	夏季	秋季	冬季
低值	0.00	0.00	0.00	0.00
中低值	0.02	0.28	0.02	0.50
中值	2.04	10.17	3.14	16.58
中高值	31.93	45.14	46.75	53.97
高值	66.01	44.42	50.08	28.95

丘、纵向沙垄、新月形沙垄为主;Ⅱ区为研究区中部,沙丘密集分布地区,面积占比最大,以新月形沙丘和沙丘链为代表,形态和结构相对复杂,高度明显增加;Ⅲ区位于沙漠东部,以高大沙山分布为主,沙丘主要类型是星状沙山和复合型沙山,形态复杂却相对稳定。Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅲ区SSIM值随季节变化均表现为春季最大,秋、夏次之,冬季最小,同时Ⅱ区SSIM值季节变化幅度明显高于Ⅰ区和Ⅲ区;SSIM值除秋季外,均为Ⅰ区最大,Ⅲ区次之,Ⅱ区最小(秋季SSIM值Ⅲ区大于Ⅰ区)。

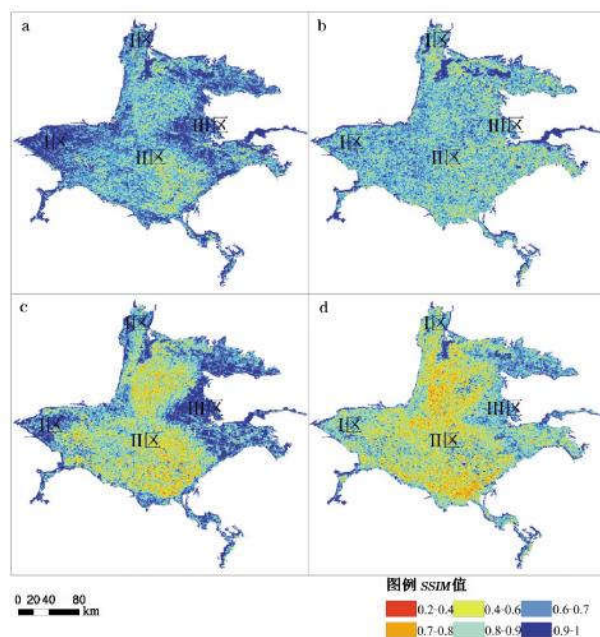
图4 季节尺度地表反照率结构相似度
(a-d 分别代表春、夏、秋、冬季)

图5为年尺度地表反照率结构相似度。巴丹吉林沙漠地表反照率空间差异性显著,SSIM值分布区间为0.4~0.6和0.6~0.7的区域所占面积比例分别为0.84%和14.09%,主要分布在沙漠腹地,其中SSIM值<0.6的区域集中在湖泊分布区。SSIM值由沙漠腹地向外沿展呈递增趋势,分布区间由0.4~0.7

提高到0.7~0.9,SSIM值为0.7~0.9区域占沙漠总面积的78.95%,表明沙漠地表反照率整体均质性较好。有6.12%的区域SSIM值分布区间为0.9~1.0,分布地区以沙漠边缘为主,同时在拐子湖西南地区 and 宗乃山东南地SSIM值达到最大。

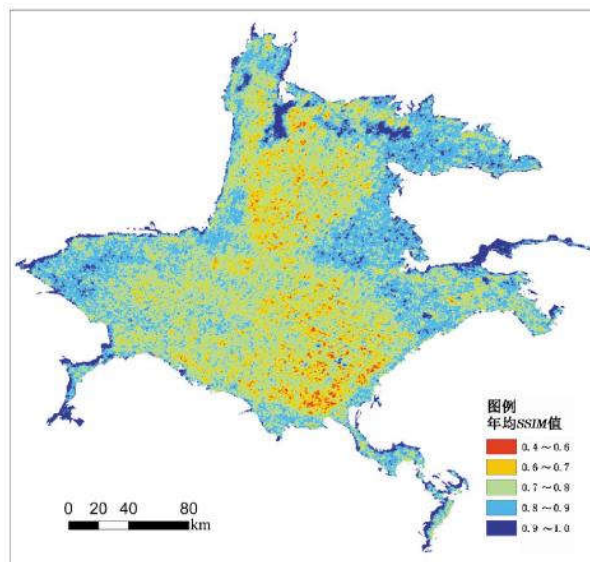


图5 年际地表反照率结构相似度

3 讨论

前人相关研究发现^[24-26],降水量是影响地表反照率年际变化的重要气象因素。冬季冰雪覆盖区域地表反照率明显高于未覆盖地区;夏季和秋季中国大部地区降水相对较多,同时地表植被覆盖较大,土壤湿度较大导致地表反照率处于全年最低时期,但植被覆盖和土壤湿度对地表反照率的影响机制具有较大争议。对比图2和图6可知,巴丹吉林沙漠地表反照率受到降水影响较大,初春沙漠干燥,沙尘天气较多,地表沙粒相对较粗且包含大量透明度较高的石英颗粒^[27],地表反照率较高。夏季沙漠受到降水增多的影响,沙土湿度增大,地表反照率减小;秋末初冬时降水减少,地表反照率随之增大;冬季沙漠区地表温度较低且部分高海拔地区存在积雪,地表反照率达到最大值。同时由于巴丹吉林沙漠高程差异较大,海拔较高处地表反照率普遍偏高且随季节变化幅度小于平坦地区,其作用机理仍存在不确定性^[28-29]。

利用结构相似度能较好的提取和表达空间的相似性^[30-31],同时结合遥感影像高时间分辨率的特点可以从时间和空间上对区域变化特征进行有效提取^[32]。巴丹吉林沙漠春季受到西北风影响,沙尘暴频繁,扬尘覆盖范围较广,区域气溶胶浓度和厚度增加^[33-34],会弱化不同下垫面类型地表反照率之间的

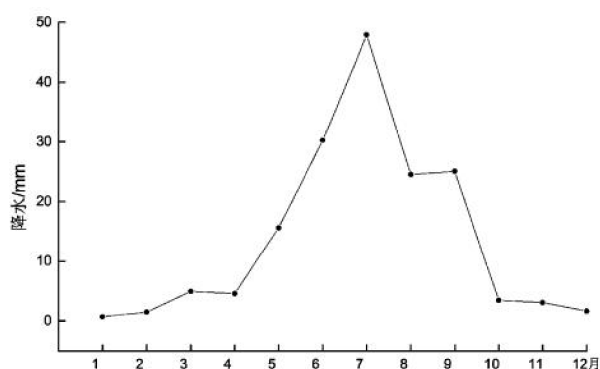


图6 巴丹吉林沙漠逐月平均降水量
(降水数据来源于文献^[36])

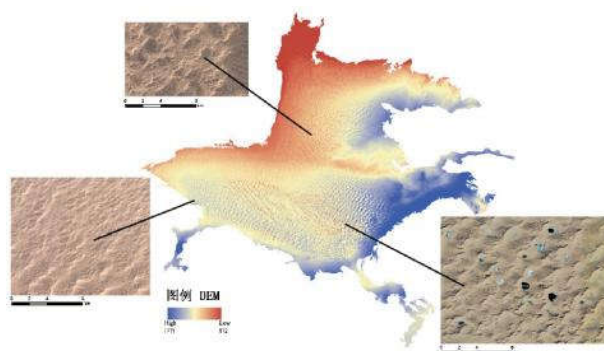


图7 巴丹吉林沙漠 DEM 及主要沙丘形态

差异,造成巴丹吉林沙漠地表反照率 $SSIM$ 值普遍偏高,其中对以流动沙地为主的西北部 and 北部影响最大,西北—东南方向上,风速随着沙丘高度的增加呈递减趋势, $SSIM$ 值减小趋势明显。夏季随着沙尘天气的减少,不同地表类型的反照率呈差异变化,同时由于降水的大幅度增加且空间分布的不均会进一步加剧不同下垫面地表反照率的空间差异性^[35], $SSIM$ 值呈减小趋势,这种减小趋势在沙漠腹地东南湖泊分布区最显著。进入秋季,随着季节性降水的减少,沙漠边缘 $SSIM$ 值较夏季增幅明显,9—11月下垫面地表温度降低趋势差异显著,地表反照率空间差异性增大, $SSIM$ 值降低,其中东部高大沙山受到海拔高度影响,减小趋势较缓, $SSIM$ 值较大。冬季部分高海拔地区和湖盆区存在冰雪,地表反照率远高于未覆盖地区,空间差异性显著, $SSIM$ 值达到最小。

结合空间分辨率为 30 m 的 DEM(图7)分析可知,沙漠地表反照率空间差异性的主要影响因素是形态参数(沙丘数量和间距)。巴丹吉林沙漠腹地沙丘数量较多且间距较小,沙丘与丘间地之间形态差异明显,结构相对复杂,造成沙漠腹地 $SSIM$ 值较低,而在东南湖泊分布区由于水体和沙丘地表反照率差异较大,相似程度最低, $SSIM$ 值基本 <0.6 。沙漠腹地向西北湖盆区和北部沙漠区扩展过程中沙丘形态由新月形沙丘和沙丘链过渡为纵向沙垄和新月形沙垄,形态趋于简单,高度降幅显著。沙漠东部以高大沙山分布为主,沙丘主要类型是星状沙山和复合型沙山,形态复杂却相对稳定。从沙漠腹地向外扩展到边缘的过程,沙丘数量逐渐减少,间距增大,空间差异性降低, $SSIM$ 值呈增大趋势,其中宗乃山东南地区和拐子湖西南地区地表覆盖类型分别为流动沙地和半流动沙地,类型单一, $SSIM$ 值达到最大。

4 结论

巴丹吉林沙漠地表反照率受降水影响,表现为冬季最大,春秋次之,夏季最小。不同海拔高度地表反照率存在明显差异,在高海拔地区,地表反照率偏大且随时间发生变化的幅度较小。

不同季节地表反照率空间特征差异性较大。春季受西北风影响地表反照率空间差异较小,在西北—东南风向上,地表反照率空间差异性增大趋势明显。夏季由于大幅降水和降水的空间分布不均导致地表反照率空间差异性逐渐增大,差异性在沙漠腹地湖泊分布区最显著。在秋冬由于不同海拔高度的差异,地表温度降低速度不同,地表反照率空间差异性呈递增趋势。

巴丹吉林沙漠地表反照率空间差异显著,其主要影响因素是沙丘数量和间距。沙丘数量较多且间距较小时, $SSIM$ 值偏小,反之则较大,同时沙丘形态简单或相对稳定会减少地表反照率空间差异性。其次地表覆盖类型的复杂程度也会影响 $SSIM$ 值,主要表现为地表覆盖类型单一, $SSIM$ 值较大;类型复杂多样, $SSIM$ 值偏小。

参考文献:

- [1] 刘振华,赵英时,宋小宁.MODIS 卫星数据地表反照率繁衍地简化模式[J].遥感技术与应用,2004,19(6):508-511.
- [2] Dickinson R E.Land Surface Processes and Climate - Surface Albedos and Energy Balance [J].Advances in Geophysics,1983,25(12):305-353.
- [3] Zhang M H.A modified formulation of fractional stratiform condensation rate in the NCAR Community Atmospheric Model (CAM2)[J].Journal of Geophysical Research,2003,108(D1):4031-4035.
- [4] 王介民,高峰.关于地表反照率遥感反演的几个问题[J].遥感技术与应用,2004,19(5):295-300.

- [5] Charney J G, Quirk W J, Chow S H, et al. A comparative study of the effect of albedo change of drought in semi-arid regions [J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1977, 34(9): 1366-1385.
- [6] Curry J A, Schramm J L, Ebert E E. Sea-ice albedo climate feedback mechanism [J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(2): 240-247.
- [7] Bloch M R. Dust-induced albedo changes of polar ice sheet sand glacioccretion [J]. *Journal of Glaciology*, 1964, 5(38): 241-244.
- [8] LIU H Z, WANG B M, Fu C B. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, Northeastern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(5): 757-764.
- [9] 苏俊礼, 汪结华, 李江萍, 等. 巴丹吉林和腾格里沙漠降水特征初步分析[J]. *干旱气象*, 2016, 34(2): 261-268.
- [10] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1087-1094.
- [11] LIU F, CHEN Y, LU H, et al. Albedo indicating land degradation around the Badain Jaran Desert for better land resources utilization[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 578: 67-73.
- [12] Kosmas C, Kairis O, Karavitis C, et al. Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: methodological approach [J]. *Environ Management*, 2014, 54(5): 951-970.
- [13] 肖登攀, 陶福祿, Moirwo J P. 全球变化下地表反照率研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1217-1224.
- [14] 郑辉, 刘树华. 沙漠陆面过程参数化与模拟[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(7): 2207-2217.
- [15] 杨阳, 杨帆, 买买提艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠塔中与巴丹吉林沙漠拐子湖地表辐射特征对比[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 172-181.
- [16] Hafner J and Kidder S Q. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(4): 448-465.
- [17] 徐兴奎, 刘素红. 中国地表月平均反照率的遥感反演[J]. *气象学报*, 2002, 60(2): 215-220.
- [18] 张乐乐, 高黎明, 陈克龙. 青海湖流域瓦颜山湿地辐射平衡和地表反照率变化特征 [J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 156-162.
- [19] 张杰, 张强, 郭锐, 等. 应用 EOS-MODIS 卫星资料反演西北干旱绿洲的地表反照率[J]. *大气科学*, 2005, 29(4): 510-517.
- [20] 郑新倩, 杨帆, 李超凡, 等. 巴丹吉林沙漠北缘拐子湖流沙下垫面近地层湍流强度和陆面过程特征 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(4): 103-112.
- [21] 陈爱军, 刘玉洁, 卞林根, 等. 中国地区 MODIS 反照率两种反演结果的比较 [J]. *气象学报*, 2012, 70(5): 1119-1127.
- [22] 苏红, 刘峻明, 王春艳, 等. 基于时间序列 MODIS LST 产品的重构研究 [J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(5): 99-107.
- [23] 杨萍, 邹学勇, 哈斯, 等. 巴丹吉林沙漠北部风沙地貌形态类型的分区研究[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(3): 210-213.
- [24] 王兴, 张强, 王胜. 中国黄土高原半湿润地区陆面温、湿特性及辐射收支特征研究 [J]. *高原气象*, 2013, 32(5): 1272-1279.
- [25] 徐田利, 邬光剑, 张学磊, 等. 基于 MODIS 数据的青藏高原冰川反照率时空分布及变化研究 [J]. *冰川冻土*, 2018, 40(5): 19-27.
- [26] 尹继福, 郑有飞, 詹习武, 等. 同化极轨卫星陆地产品对改善陆面模式模拟能力研究进展[J]. *高原气象*, 2016, 35(1): 260-276.
- [27] 胡文峰, 何清, 杨兴华. 沙尘暴过程中气象要素响应及输沙分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 6(3): 34-39.
- [28] 翁笃鸣. 中国辐射气候研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- [29] 蒋熹, 王宁练, 蒲健辰, 等. 夏季消融期祁连山“七一”冰川反照率初步研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(5): 752-760.
- [30] Baker L, Mills S, Langlotz T, et al. Power line detection using Hough transform and line tracing techniques [C]. *Proceedings of International Conference on Image and Vision Computing*. Wellington, New Zealand: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [31] 李建勋, 佟瑞, 张永进, 等. 基于趋势面与 SSIM 的时空数据相似度算法[J]. *计算机工程*, 2018, 44(9): 52-58.
- [32] 白雪娇, 王鹏新, 解毅, 等. 基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 345-351.
- [33] Kaufman Y J, Nakajima T. Effect of Amazon Smoke on Cloud Microphysics and Albedo -Analysis from Satellite Imagery [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(4): 729-744.
- [34] ZHUANG G, GUO J, YUAN H, et al. The compositions, sources, and size distribution of the dust storm from China in spring of 2000 and its impact on the global environment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(11): 895-901.
- [35] 王乃昂, 马宁, 陈红宝, 等. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 153-160.
- [36] 苏俊礼, 汪结华, 李江萍, 等. 巴丹吉林和腾格里沙漠降水特征初步分析[J]. *干旱气象*, 2016, 34(2): 261-268.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Surface Albedo in Badain Jaran Desert Based on Structural Similarity

HE Peng¹, ZHENG Xinqian², XU Lishuai¹, YANG Fan³

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2.Xinjiang Agro-Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

3.Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract In order to study the variation of surface albedo in Badain Jaran Desert, the spatial and temporal distribution characteristics of surface albedo in Badain Jaran Desert were analyzed by using the Structural Similarity (SSIM) based on the short-wave of MODIS black-sky-albedo (BSA). The results show that there were significant differences in SSIM of surface albedo of different dune types under the wind, precipitation, surface temperature and altitude on time scale. SSIM of surface albedo was the largest in spring and the smallest in winter. But there were significant differences in values and ranges of SSIM for different dune types. In space, the number and spacing of dunes are the main affecting factors of the change of surface albedo in Badain Jaran Desert. With the increase of dune number and decrease of distance between dunes, the SSIM value decreased, vice versa. At the same time, the spatial difference of surface albedo will reduce when morphological change of dunes was simple or relatively stable.

Key words surface albedo; Badain Jaran Desert; structural similarity; morphological parameters