

DOI:10.11918/202007003

# 地表反照率和植被覆盖度对矿区热环境的影响

侯春华<sup>1,2</sup>, 李富平<sup>1</sup>, 何宝杰<sup>3,4</sup>, 马朋坤<sup>5</sup>, 宋文<sup>1,6</sup>, 赵菁菁<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 唐山师范学院 计算机科学系, 河北 唐山 063000;  
3. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400405; 4. 澳大利亚新南威尔士大学 建筑环境学院, 澳大利亚 悉尼 2052;  
5. 北京城市气象研究院城市边界层与大气环境研究所, 北京 100089; 6. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 为分析由于矿产资源的高强度开采导致地表原有植被遭到破坏, 使得地表反照率发生改变进而对矿区地表热环境造成的影响。以河北省迁安市马兰庄铁矿为例, 利用 Landsat 遥感影像可见光波段基于统计模型法反演地表反照率, 基于 NDVI-DFI 的像元三分模型反演植被覆盖度, 对热红外波段基于辐射传输方程法反演地表温度, 借助叠加分析法、相关分析法和回归分析法, 定量化和可视化探究了地表热环境时空异质性对光合植被覆盖度和地表反照率变化的响应规律。结果表明: 研究区地表热环境空间分布呈现明显的异质性和规律性, 高温区主要分布于北部沙河山采场、中部柳河峪排土场和南部未复垦的白马山排土场, 中温区主要位于高温区边缘以及其他裸露地表, 低温区主要位于北部已复垦尾矿库和已复垦排土场以及境内绿地和水体; 光合植被覆盖度和地表反照率的时空变化, 导致研究区夏季午间地表热环境异质性较大, 3 期影像下垫面地表温度均值排序为: 矿区采场裸岩 > 排土场矿渣 > 复垦植被 > 水体; 光合植被覆盖度和地表温度的回归分析结果表明二者在 0.01 水平(双侧)呈线性负相关关系( $p < 0.01$ ), 说明光合植被覆盖度的增加对地表热环境具有降温效应, 决定系数  $R^2$  分别为 0.63、0.55、0.65, 由回归系数可知, 2000 年、2008 年和 2018 年, 光合植被覆盖度每增加 10%, 会使地表温度相应下降 0.66、0.74、1.09 °C; 地表反照率和地表温度的回归分析结果表明二者在 0.01 水平(双侧)呈线性正相关关系( $p < 0.01$ ), 说明地表反照率的增加对地表热环境具有增温效应, 决定系数  $R^2$  分别为 0.35、0.40、0.48, 由回归系数可知, 2000 年、2008 年和 2018 年, 地表反照率每增加 10%, 会使地表温度相应上升 1.09、1.36、1.76 °C。研究结果将对矿区地表热环境异质性的评估和优化提供定量参考依据。

**关键词:** 遥感; 地表反照率; 光合植被覆盖度; 地表温度; 矿区

**中图分类号:** X87      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2022)12-0117-10

## Influence of surface albedo and vegetation fractional coverage on thermal environment of mining area

HOU Chunhua<sup>1,2</sup>, LI Fuping<sup>1</sup>, HE Baojie<sup>3,4</sup>, MA Pengkun<sup>5</sup>, SONG Wen<sup>1,6</sup>, ZHAO Jingjing<sup>1</sup>

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;  
2. Department of Computer Science, Tangshan Normal University, Tangshan 063000, Hebei, China;  
3. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400405, China;  
4. Faculty of Built Environment, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia;  
5. Institute of Urban Boundary Layer and Atmospheric Environment, Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089, China;  
6. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The influence of the changes in surface albedo on the thermal environment of the mining area due to the destruction of the original vegetation caused by the high-intensity mining of mineral resources was analyzed. Taking Malanzhuang Iron Mine in Qian'an city of Hebei province as an example, the statistical model method was adopted to retrieve the surface albedo based on the visible light band of Landsat remote sensing image, and the pixel trisection model was used to retrieve the vegetation fractional coverage based on NDVI-DFI. By means of radiative transfer equation method, the land surface temperature (LST) was retrieved based on the thermal infrared band of Landsat remote sensing image. With the aid of superposition analysis method, correlation analysis method, and regression analysis method, the response of spatiotemporal heterogeneity of surface thermal environment to the changes in photosynthetic vegetation coverage ( $f_{pv}$ ) and surface albedo was quantitatively and visually explored. Results showed that the spatial distribution of surface thermal environment in the study area showed obvious

收稿日期: 2020-07-01

基金项目: 河北省重点研发计划(19224204D); 河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2014029); 唐山市科学技术研究与发展计划重点项目(19150247E); 唐山市科技创新团队培养计划(19130206C); 唐山市科技研发平台培养计划(2020TS003b)

作者简介: 侯春华(1981—), 女, 博士, 讲师;  
李富平(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李富平, 18603158003@163.com

heterogeneity and regularity. The high temperature zone was mainly distributed in the northern Shaheshan stope, central Liuheyu dump, and the unreclaimed Baimashan dump in the south. The moderate temperature zone was mainly located at the edge of the high temperature zone and other bare surfaces. The low temperature zone was mainly located in the northern reclaimed tailings pond and reclaimed waste dump, as well as the green land and water bodies in the area. The spatiotemporal variation of photosynthetic vegetation coverage and surface albedo resulted in a large heterogeneity of the surface thermal environment during the summer midday in the study area. The mean surface temperature of underlying surface in the third phase of the image was ranked as follows: mining area bare rock > dump slag > reclamation vegetation > water body. The regression analysis results showed that  $f_{PV}$  at 0.01 level (double sides) had a negative linear correlation with LST ( $p < 0.01$ ), indicating that the increase in  $f_{PV}$  has a cooling effect on surface thermal environment, and the determination coefficients ( $R^2$ ) were 0.63, 0.55, and 0.65, respectively. According to the regression coefficient, in 2000, 2008, and 2018, for every 10% increase in  $f_{PV}$ , LST decreased by 0.66, 0.74, and 1.09 °C. The regression analysis results showed that albedo at 0.01 level (double sides) had a positive linear correlation with LST ( $p < 0.01$ ), indicating that the increase in albedo has a warming effect on surface thermal environment, and the determination coefficients ( $R^2$ ) were 0.35, 0.40, and 0.48, respectively. According to the regression coefficient, in 2000, 2008, and 2018, every 10% increase in albedo led to the increase in LST by 1.09, 1.36, and 1.76 °C. The research results will provide a quantitative reference for the evaluation and optimization of the surface thermal environment heterogeneity in mining area.

**Keywords:** remote sensing; surface albedo; fractional cover of photosynthetic vegetation; land surface temperature; mining area

地表温度(Land surface temperature, LST)是表征大气底层和陆地表层之间热量状况的重要指标,其变化主要受地表反照率(Albedo)和下垫面性质等因素的影响<sup>[1]</sup>。地表反照率是描述地表辐射特征的量纲一的参数<sup>[2]</sup>,时空变化受到自然过程以及人类活动的影响,例如工业化、城市化以及季节变化等都会对地表反照率造成影响,进而影响地表温度<sup>[3-4]</sup>。Hansen 等<sup>[5]</sup>研究得出全球土地利用变化会导致地表反照率发生变化,从而引起全球净辐射减少,使得气温下降。矿产资源开采活动改变了原有地表下垫面性质,大量植被遭到破坏,使得地表反照率发生变化,进而影响地表辐射平衡和热量状况<sup>[6]</sup>。

以往研究只考虑植被覆盖的动态变化对地表热环境的驱动作用<sup>[7-9]</sup>。研究表明,植被的降温作用一定程度上是因为光合植被(Photosynthetic vegetation, PV)叶面的水分含量,如 Amiri 等<sup>[10]</sup>在伊朗的研究表明,高植被覆盖区因植被含水量变化导致地温在低温和高温特征之间相互转变。因而提取光合植被覆盖度(fractional cover of photosynthetic vegetation,  $f_{PV}$ )信息,分析其动态变化引起地表反照率发生改变进而对地表热环境的驱动作用具有重要意义。近年来,地表反照率的时空特征研究一直备受关注,这些研究大多都是大、中尺度区域地表反照率时空分布变化特征<sup>[11-13]</sup>,对于矿业开采导致矿区内部光合植被覆盖改变引起地表反照率时空分布及其特征发生变化,进而加剧地表热环境异质性的分

析研究相对薄弱。

基于此,本文基于 2000 年、2008 年和 2018 年 3 期 Landsat 遥感影像的可见光波段,反演光合植被覆盖度与地表反照率,基于热红外波段反演地表温度。利用叠加分析、相关分析和回归分析法,定量化和可视化分析了  $f_{PV}$  和 Albedo 与地表温度的相关性,进而探究由于矿产开发引起矿区光合植被覆盖时空变化导致地表反照率变化之间的潜在关系,并揭示矿区地表热环境异质性对光合植被覆盖度和地表反照率变化的响应规律。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况及数据源

#### 1.1.1 研究区概况

唐山首钢马兰庄铁矿位于河北省唐山市东北部的迁安市马兰庄镇境内(如图 1 所示)。迁安市以山地和丘陵为主,地势西北高,东南低,属暖温带、半湿润大陆性季风气候,全年气温变化较大。马兰庄铁矿矿区面积 2.9 km<sup>2</sup>,于 1970 年开始建矿,1972 年正式投产。矿山目前采用露天开采方式,主要包括白马山和沙河山 2 个采场,白马山采场于 2007 年末闭坑。矿区东临滦河、北依燕山、西与迁西接壤、南与首钢矿区相连,矿藏丰富。矿山于 2008 年、2009 年和 2010 年分别在尾矿库、柳河峪排土场和白马山排土场持续实施植被恢复工程,主要种植刺槐、火炬树、沙棘等适宜于矿区自然条件的先锋植物和适宜树种<sup>[14]</sup>。

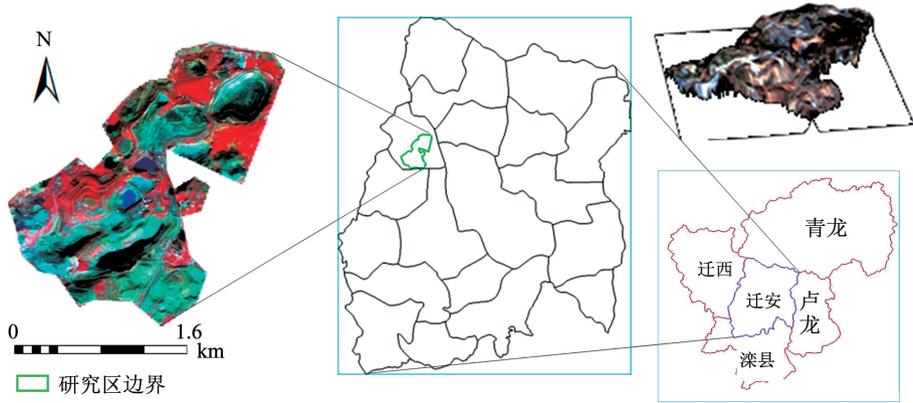


图 1 研究区位置与三维示意图

Fig. 1 Location of study area and three-dimensional diagram

### 1.1.2 数据源及预处理

1) 遥感影像数据。所用数据分别为 2000 年 9 月 6 日、2008 年 9 月 12 日和 2018 年 9 月 8 日,来源于美国地质调查局 (USGS) Landsat 官方网站 (<http://glovis.usgs.gov/>), Level 1T 级中分辨率系列卫星产品 (轨道号 122/32), 分辨率为 30 m, 云量均小于 2%, 经查验 3 期影像过境时间均为上午 10:00 ~ 11:00 之间, 卫星过境全天均无降水, 天气状况较好, 适宜进行地表反照率和 LST 反演。来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 的, 分辨率为 250 m 的与 Landsat 数据获取日期一致的 MODIS 地表反射率产品 MOD09GQ, 用于对 Landsat 反演的地表反照率进行验证。

预处理工作依托 ENVI5.3 软件平台, 对各期 Landsat 影像进行辐射定标, 大气校正和裁剪。各期 MOD09GQ 产品依托 ArcGIS10.2 软件进行投影变换使之与 Landsat 投影保持一致, 最后拼接和裁剪。

2) 实地调查数据。于 2018 年 9 月 9 日派出具有野外实地工作经验, 并具有一定地理学理论基础的实测人员 5 人, 采用实地测量法定量验证植被覆盖度反演精度。在矿区内选取 10 个有代表性的 30 m × 30 m 的网格, 网格中心点周围的植被覆盖度均存在一定差异, 尽量包含 0 ~ 100% 的植被覆盖范围, 分别记录下各网格单元中心点的经、纬度坐标。每个网格由 5 位观测员分别轮流站在网格单元的中心点进行目视观测, 并分别将观测结果记录下来, 观测结束后对每个网格的植被覆盖度观测结果求取均值。

3) 其他数据。中国县级行政矢量图的研究区矢量边界数据; 2018 年 9 月 28 日空间分辨率为全色 2 m、多光谱 8 m 的 GF-1 卫星遥感影像; 谷歌地球高分辨率影像, 用于辅助目视解译矿区地表扰动类型。

### 1.1.3 地表下垫面扰动类型提取

在参考中国土地利用现状调查分析体系和国土资源部土地利用分类体系的基础上, 经过实地调研

结合谷歌地球高分辨率影像, 考虑迁安市首钢马兰庄铁矿地表下垫面覆被状况, 利用目视解译法提取境内沙河山采场、尾矿库、柳河峪排土场、白马山排土场和水体等几类对地表热环境异质性影响较大的典型地物边界 (如图 2 所示)。

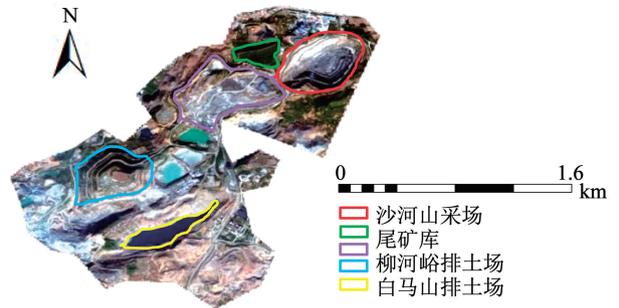


图 2 2018 年研究区主要典型地物边界图

Fig. 2 Image of typical ground features of study area in 2018

## 1.2 地表温度反演及等级划分

### 1.2.1 地表温度反演

利用辐射传输方程法 (Radiative transfer equation, RTE) 反演地表温度, 基本原理为估计大气对地表热辐射的影响, 将这一部分从卫星传感器所观测到的热辐射总量中减去, 得到地表热辐射强度, 然后借助大气辐射传输方程, 将卫星所观测到地表热辐射强度转化为相应地表温度<sup>[15]</sup>。

卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值的辐射传输方程为

$$L_{\lambda} = [\varepsilon B(T) + (1 - \varepsilon)L_d] \tau + L_u \quad (1)$$

式中:  $L_{\lambda}$  为卫星热红外波段的辐射亮度,  $\varepsilon$  为地表比辐射率,  $T$  为地表真实温度,  $B(T)$  为黑体热辐射亮度,  $\tau$  为大气在热红外波段的透过率,  $L_u$ 、 $L_d$  分别为大气上行和下行辐射亮度<sup>[16]</sup>。

假设大气、地表对热辐射具有朗伯体性质, 则温度为  $T$  的黑体在热红外波段的辐射亮度  $B(T)$  为

$$B(T) = [L_{\lambda} - L_u - \tau(1 - \varepsilon)L_d] / \tau\varepsilon \quad (2)$$

地表比辐射率计算公式为

$$\varepsilon = 0.004P_v + 0.986 \quad (3)$$

通过覃志豪等<sup>[17]</sup>提出的方法计算地表比辐射率  $\varepsilon$ 。地面真实温度  $T$  根据普朗克公式为

$$T = K_2 / \ln(K_1 / B(T) + 1) \quad (4)$$

式中:  $K_1$ 、 $K_2$  为热红外波段的定标参数, 对于 Landsat5 TM 影像第 6 波段,  $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$ ,  $K_2 = 1260.56 \text{ K}$ ; 对于 Landsat8 TIRS 影像第 10 波段,  $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$ ,  $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ <sup>[18]</sup>。大气校正参数  $\tau$ 、 $L_u$  和  $L_d$  在美国国家航空航天局 NASA 官网 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 中输入影像中心经纬度、成像时间和其他参数信息获取。

### 1.2.2 地表温度分级

为反映研究区地表温度值等级及分布特征, 利用密度分割法将反演所得地表温度数据进行等级划分。为使不同年份的地表温度数据能在统一的量纲下进行对比, 并消除气候等大背景环境因素年代间的不确定性和变化性的影响, 参考已有研究<sup>[19]</sup>, 首先对地表温度进行正规化处理 (Normalized land surface temperature, NLST)<sup>[20]</sup>, 其计算公式如下:

$$\text{NLST} = (\text{LST} - \text{LST}_{\min}) / (\text{LST}_{\max} - \text{LST}_{\min}) \quad (5)$$

式中: NLST 为正规化后的地表温度值, LST 为原始地表温度值,  $\text{LST}_{\max}$ 、 $\text{LST}_{\min}$  分别为 LST 影像中的最大值和最小值。

根据 NLST 的取值范围, 依托 ArcGIS10.2 软件, 以 0.2 为间隔将 NLST 划分为 5 个热力等级, 分别为低温、次低温、中温、次高温和高温 (见表 1), 更加系统地反映研究区地表温度等级分布状况。

表 1 地表温度等级划分标准

Tab. 1 Classification standard of land surface temperature

温度等级	温度范围
低温区	$0 \leq \text{NLST} < 0.2$
次低温区	$0.2 \leq \text{NLST} < 0.4$
中温区	$0.4 < \text{NLST} \leq 0.6$
次高温区	$0.6 < \text{NLST} \leq 0.8$
高温区	$0.8 < \text{NLST} \leq 1.0$

## 1.3 光合植被覆盖度反演及验证

### 1.3.1 光合植被覆盖度反演

通过构建 NDVI-DFI 特征空间提取纯净端元特征值, 利用像元三分模型对研究区混合像元进行分解, 分解为光合植被覆盖度、非光合植被覆盖度 (fractional cover of NPV,  $f_{\text{NPV}}$ ) 和裸土覆盖度, 单独保存各波段以此来获取光合植被覆盖度信息。经实

地采样验证, 像元三分模型在研究区  $f_{\text{PV}}$  的估算精度较高。具体计算步骤详见文献<sup>[21]</sup>。为了对不同年份的  $f_{\text{PV}}$  在统一的量纲下进行对比, 利用以下公式对  $f_{\text{PV}}$  进行正规化处理, 使其值域在  $[0, 1]$  之间:

$$Nf_{\text{PV}} = (f_{\text{PV}} - (f_{\text{PV}})_{\min}) / ((f_{\text{PV}})_{\max} - (f_{\text{PV}})_{\min}) \quad (6)$$

式中:  $Nf_{\text{PV}}$  为正规化后的光合植被覆盖度,  $f_{\text{PV}}$  为原始光合植被覆盖度,  $(f_{\text{PV}})_{\max}$ 、 $(f_{\text{PV}})_{\min}$  分别为原始光合植被覆盖度的最大值和最小值。

### 1.3.2 验证

分别利用定性和定量方法进行验证。首先利用 GF-1 假彩色影像对植被覆盖度 (Vegetation fractional coverage, VFC) 反演结果进行了定性验证。绘制了研究区 2018 年 9 月 8 日 NDVI-DFI 特征空间散点图, 并截取同期研究区内典型地物  $f_{\text{PV}}$ 、 $f_{\text{NPV}}$  和  $f_{\text{BS}}$  的 RGB 空间分布图, 与近同期 2018 年 9 月 28 日 GF-1 假彩色影像上的真实地物做对比 (如图 3 所示)。图 3(a) 为非光合植被反演结果; 图 3(b) 为对应 GF-1 影像中的非光合植被; 图 3(c) 为裸土反演结果; 图 3(d) 为对应 GF-1 影像中的裸土; 图 3(i) 为光合植被反演结果; 图 3(j) 为对应 GF-1 影像中的光合植被; 图 3(k)、3(g) 为非光合植被伴生于光合植被中的反演结果; 图 3(l)、3(h) 为对应的 GF-1 影像; 图 3(e) 为混合光合/非光合植被和裸土的反演结果; 图 3(f) 为对应的 GF-1 影像。结果表明和实际地物吻合度较高, 反演效果较好。

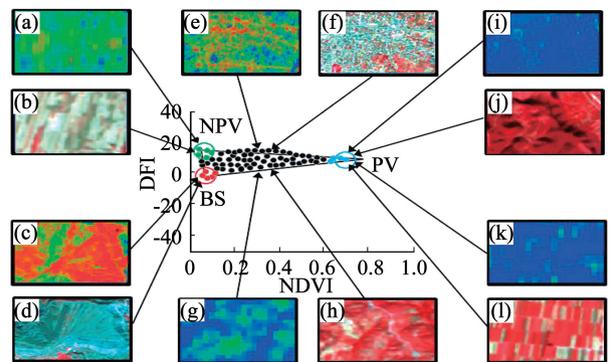


图 3 利用 GF-1 影像对基于 NDVI-DFI 像元三分模型反演 VFC 的结果作定性验证

Fig. 3 Qualitative validation of vegetation fractional coverage inverted from GF-1 imagery based on NDVI-DFI pixel trisection model

然后按照经、纬度一致原则, 提取实地采样点相应位置像元  $f_{\text{PV}}$ 、 $f_{\text{NPV}}$  和  $f_{\text{BS}}$  的均值, 对实测值和反演值进行线性拟合进行定量验证 (如图 4 所示)。拟合结果表明,  $f_{\text{PV}}$ 、 $f_{\text{NPV}}$  和  $f_{\text{BS}}$  的实测值和反演值的决定系数  $R^2$  分别为 0.78、0.70 和 0.76, 在  $p < 0.01$  水平上显著相关, 拟合度较好, 反演精度较高。

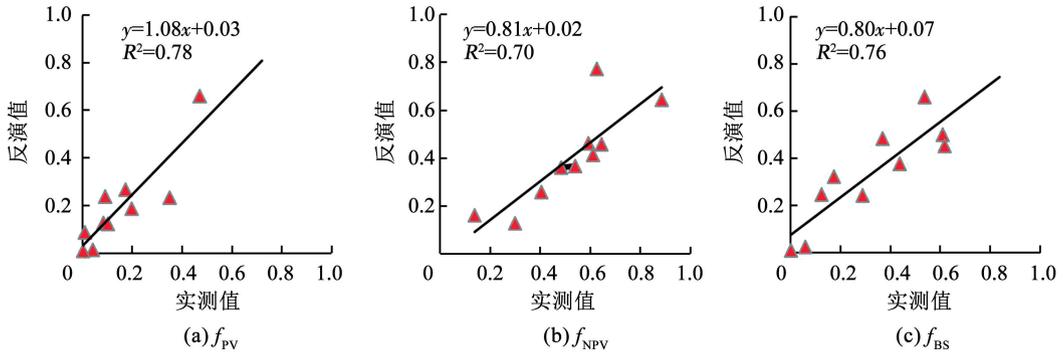


图 4  $f_{PV}$ 、 $f_{NPV}$  和  $f_{BS}$  的反演值和实测值

Fig. 4 Inversion values and measured values of  $f_{PV}$ ,  $f_{NPV}$ , and  $f_{BS}$

### 1.4 地表反照率 (Albedo) 反演及验证

#### 1.4.1 地表反照率 (Albedo) 反演

地表反照率反演算法参考 Liang<sup>[22]</sup> 于 2011 年建立的,适用于不同大气和下垫面类型的公式:

$$\begin{aligned} \text{Albedo} = & 0.356 \times R_{\text{blue}} + 0.130 \times R_{\text{red}} + \\ & 0.373 \times R_{\text{nir}} + 0.085 \times R_{\text{swir1}} + \\ & 0.072 \times R_{\text{swir2}} - 0.0018 \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $R_{\text{blue}}$ 、 $R_{\text{red}}$ 、 $R_{\text{nir}}$ 、 $R_{\text{swir1}}$  和  $R_{\text{swir2}}$  分别为传感器对应的蓝、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的光谱反射率, Albedo 为地表反照率。

为了对不同年份的 Albedo 在统一的量纲下进行对比,利用以下公式对 Albedo 行正规化处理,使其值域在 [0, 1] 之间:

$$\text{NAlbedo} = (\text{Albedo} - (\text{Albedo})_{\text{min}}) / ((\text{Albedo})_{\text{max}} - (\text{Albedo})_{\text{min}}) \quad (8)$$

式中: NAlbedo 为正规化后的地表反照率, Albedo 为原始地表反照率,  $(\text{Albedo})_{\text{max}}$ 、 $(\text{Albedo})_{\text{min}}$  分别为原始地表反照率的最大值和最小值。

#### 1.4.2 地表反照率验证

分别利用定性和定量方法进行验证。首先,以 2000 年分辨率为 250 m 的 MODIS 的 MOD09GQ 陆地反射率产品为数据源,对以同年分辨率为 30 m 的基于 Landsat 影像反演的 Albedo 结果的空间一致性进行相对验证。由于 MOD09GQ 空间分辨率较低,矿区尺度较小,以矿区范围进行对比不能很好的观察二者空间对应情况。因此以整个迁安市 2000 年影像为例,对反演结果进行相对验证,可以看出二者的高值区和低值区的对应效果较好,并且 Landsat 反演结果的空间分辨率更高,更适合对小尺度矿区境内的地表反照率进行分析(如图 5 所示)。

然后利用定量验证方法,从研究区境内随机选取 20 个采样点,对基于 Landsat 数据反演的 Albedo 结果与 MOD09GQ 地表反射率产品进行线性拟合(如图 6 所示)。可以看出二者具有较高的相关性,

决定系数  $R^2$  达 0.86,说明研究区适宜利用该方法反演 Albedo,反演结果精度较高。

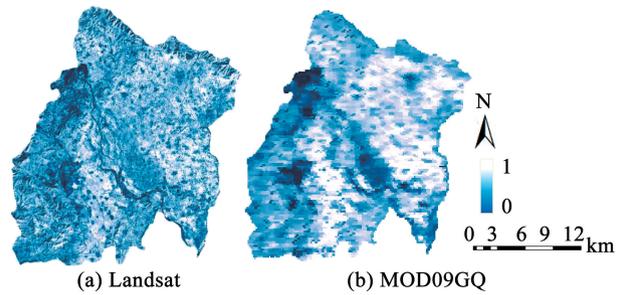


图 5 2000 年 Landsat 反演地表反照率与 MOD09GQ 反射率产品

Fig. 5 Surface albedo inverted based on Landsat and MOD09GQ albedo product in 2000

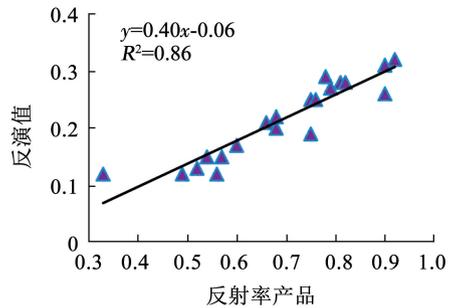


图 6 基于 Landsat 的 Albedo 反演值和 MOD09GQ 反射率产品

Fig. 6 Albedo inversion values based on Landsat and MOD09GQ albedo product

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于 $f_{PV}$ 和 Albedo 的地表热环境异质性特征

基于 3 期 Landsat 影像反演的地表温度结果,均呈现明显的空间异质性和规律性,说明 Landsat 数据的空间分辨率能达到该研究区尺度下的地表温度反演要求,满足地表热环境的空间分布研究(如图 7 所示)。对照图 1 可知,高温区主要分布于北部沙河山采场、中部柳河峪排土场和南部未复垦的白马

山排土场,中温区主要位于高温区边缘以及其他裸露地表,低温区主要位于北部已复垦尾矿库和已复垦排土场以及境内绿地和水体。

为进一步明晰矿区地表热环境异质性特征,利用 ArcGIS10.2 的叠加分析功能,分别计算矿区各地物地温均值(见表 2)。结果表明,2000 年地温排序为:白马山排土场 > 沙河山采场 > 柳河峪排土场 > 尾矿库 > 水域,2008 年地温排序为:白马山排土场 > 柳河峪排土场 > 沙河山采场 > 尾矿库 > 水域;2018 年地温均值排序为:沙河山采场 > 柳河峪排土场 > 白马山排土场 > 尾矿库 > 水域。19 年间白马

山排土场的地温排序变动情况可知,2000—2008 年矿区处于大规模开采期,白马山排土地温在这 9 年间始终居高不下;2008 年开始随着生态复垦工作的实施,白马山排土场开始栽植大量灌木和乔木等耐旱耐高温植被,使得 2018 年该区域地温均值低于沙河山采场和柳河峪排土场,说明 2008—2018 年间,白马山排土场的生态修复工作效果较好,随着植被覆盖和地表湿度的明显上升,地表反照率下降,地表温度明显下降,此外,还应考虑到不同地表植被对于直接太阳辐射和间接太阳辐射的反射与散射问题导致的地表热环境异质性问题。

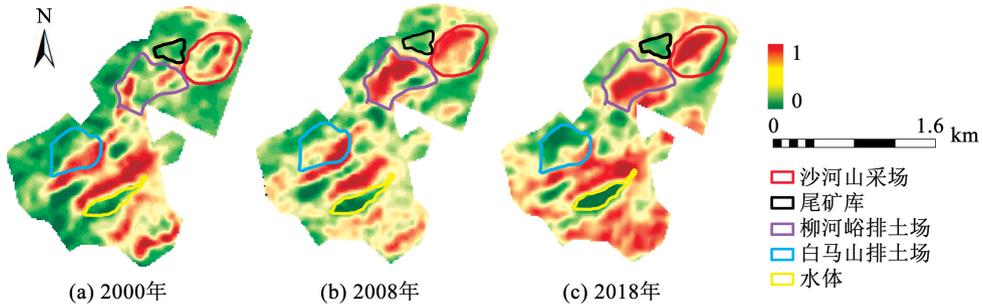


图 7 2000—2018 年 NLST 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of NLST from 2000 to 2018

表 2 2000—2018 年马兰庄矿各地物地表温度均值

Tab. 2 Mean values of LST of ground features in Malanzhuang Iron Mine from 2000 to 2018

年份	沙河山采场	柳河峪排土场	白马山排土场	尾矿库	水域
2000	26.44	26.13	28.45	24.77	18.51
2008	34.14	35.07	35.44	28.23	24.24
2018	37.38	37.67	28.07	27.84	22.84

### 2.2 $f_{PV}$ 和 Albedo 与地表温度相关性分析

为探究  $f_{PV}$  和 Albedo 与地表温度的相关关系,利用 ENVI5.3 软件的密度分割工具,分别对  $f_{PV}$ 、Albedo 和 NLST 进行等级划分,划分规则为每隔 0.2 为一个等级(如图 8 所示),并利用 ArcGIS10.2 软件的统计工具计算  $f_{PV}$ 、Albedo 和 NLST 各级别面积占比(见表 3~5)。

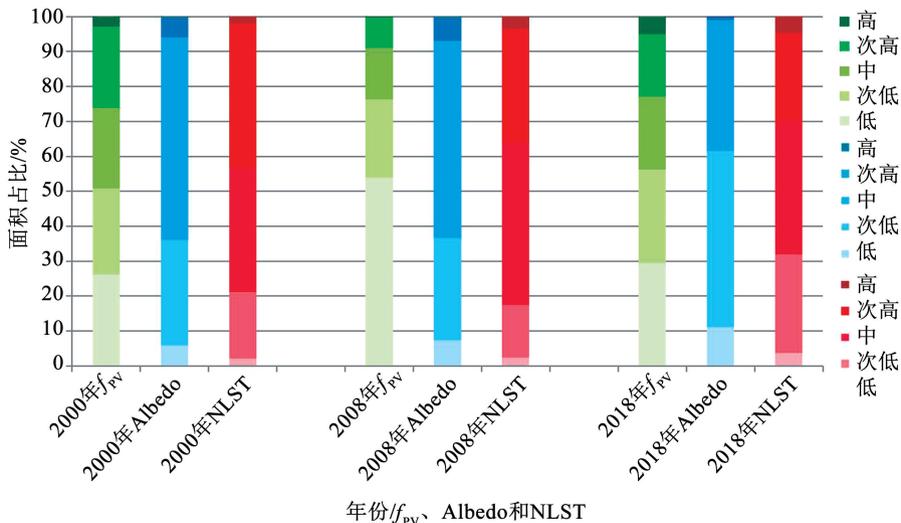


图 8 2000—2018 年  $f_{PV}$ 、Albedo 和 NLST 等级占比

Fig. 8 Proportions of each level of  $f_{PV}$ , albedo, and NLST from 2000 to 2018

表 3 2000—2018 年  $f_{PV}$  各等级占比Tab. 3 Proportion of each level of  $f_{PV}$  from 2000 to 2018

$f_{PV}$ 分级	分级占比/%			面积增减变化/%		
	2000 年	2008 年	2018 年	2000—2008 年	2008—2018 年	2000—2018 年
低	26.21	53.86	29.50	27.65	-24.36	3.29
次低	24.61	22.47	26.68	-2.14	4.21	2.07
中	22.96	14.68	20.96	-8.28	6.28	-2.00
次高	23.41	8.73	17.82	-14.68	9.09	-5.59
高	2.82	0.26	5.03	-2.56	4.77	2.21

表 4 2000—2018 年 Albedo 各等级占比

Tab. 4 Proportion of each level of albedo from 2000 to 2018

Albedo 分级	分级占比/%			面积增减变化/%		
	2000 年	2008 年	2018 年	2000—2008 年	2008—2018 年	2000—2018 年
低	5.84	7.31	11.14	1.47	3.83	5.30
次低	30.24	29.47	50.46	-0.77	20.99	20.22
中	57.98	56.22	37.46	-1.76	-18.76	-20.52
次高	5.81	6.94	0.89	1.13	-6.05	-4.92
高	0.13	0.06	0.05	-0.07	-0.01	-0.08

表 5 2000—2018 年 NLST 各等级占比

Tab. 5 Proportion of each level of NLST from 2000 to 2018

温度分级	分级占比/%			面积增减变化/%		
	2000 年	2008 年	2018 年	2000—2008 年	2008—2018 年	2000—2018 年
低	2.13	2.33	3.66	0.20	1.33	1.53
次低	19.07	15.17	28.31	-3.90	13.14	9.24
中	35.51	46.51	38.16	11.00	-8.35	2.65
次高	41.35	32.52	25.06	-8.83	-7.46	-16.29
高	1.94	3.48	4.81	1.57	1.33	2.90

2000—2008 年间, 由于矿业大规模开采, 植被遭到破坏,  $f_{PV}$  的高、次高和中等级别面积总占比由 2000 年的 49.19%, 下降到 2008 年的 23.67%, 下降了 25.52 个百分点。随着  $f_{PV}$  的下降, 采场裸岩逐渐出露, 和矿区采场、未复垦排土场和未复垦尾矿库等裸露地表相重叠的高温、次高温和中温区, 面积总占比由 2000 年的 78.8% 上升到 2008 年的 82.51%, 增加了 3.71 个百分点。2008—2018 年间, 随着矿区生态修复工作着手实施, 尾矿库和排土场等区域栽植了大量植被和作物,  $f_{PV}$  由 2008 年的 23.67%, 上升到 2018 年的 43.81%, 上升了 20.14 个百分点。随着  $f_{PV}$  的上升, 高温、次高温和中温区, 面积总占比由 2008 年的 82.51% 下降到 2018 年的 68.03%, 下降了 14.48 个百分点。2000—2018 年 19 年间, 高温、次高温和中温区面积占比下降了 10.77 个百分点, Albedo 等级高、次高和中级面积占比下降了 25.52 个百分点, 说明生态修复工作成效显著。

为进一步探究  $f_{PV}$  和 Albedo 与地表温度之间的

关系, 以 2018 年为例, 依托 ENVI5.3 软件, 分别利用  $f_{PV}$  和 Albedo 与地表温度做散点图 (如图 9 所示), 结果表明  $f_{PV}$  与 LST 呈现明显的负相关关系, Albedo 与 LST 呈现明显的正相关关系。可据此初步认为,  $f_{PV}$  的增加有助于缓解地表热强度, Albedo 的增大有助于增强地表热强度。

### 2.3 光合植被覆盖度对地表热环境异质性的驱动作用

2000—2018 年  $f_{PV}$  空间分布具有明显的异质性和规律性 (如图 10 所示), 高值区分布于已复垦排土场和尾矿库以及其他植被覆盖区域, 中低值区位于矿区采场裸岩和排土场裸土等裸露区域和水体。利用 ArcGIS10.2 的叠加分析功能, 计算 3 期影像不同下垫面 LST 和  $f_{PV}$  均值并排序: 矿区采场裸岩 LST 均值  $35.29^{\circ}\text{C}$  > 排土场矿渣 LST 均值  $35.02^{\circ}\text{C}$  > 复垦植被 LST 均值  $25.25^{\circ}\text{C}$  > 水体 LST 均值  $21.77^{\circ}\text{C}$ ; 复垦植被  $f_{PV}$  均值  $0.73$  > 排土场矿渣  $f_{PV}$  均值  $0.09$  > 矿区采场裸岩  $f_{PV}$  均值  $0.03$  > 水体  $f_{PV}$  均值  $0.00$ 。

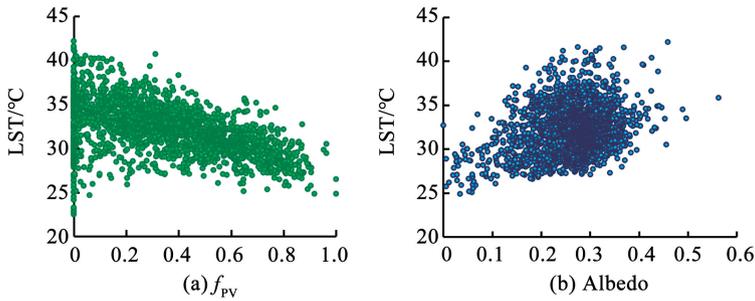


图 9 2018 年马兰庄矿地表温度与  $f_{PV}$  和 Albedo 散点图

Fig. 9 Scatter plots of LST,  $f_{PV}$ , and albedo in Malanzhuang Iron Mine in 2018

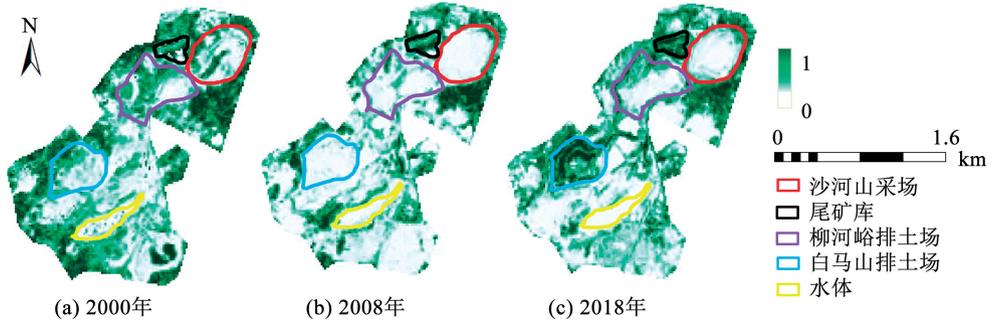


图 10 2000—2018 年光合植被覆盖度空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of  $f_{PV}$  from 2000 to 2018

为定量分析地表热环境异质性对  $f_{PV}$  变化的响应规律。依托 ArcGIS10.2 软件提取随机点工具,以及 SPSS22.0 软件的相关分析功能对 3 期影像的  $f_{PV}$  和 LST 反演值进行回归分析(如图 11 所示)。结果表明,2000、2008、2018 年决定系数  $R^2$  分别为 0.63、

0.55 和 0.65,  $f_{PV}$  与 LST 在 0.01 水平(双侧)呈线性负相关关系( $p < 0.01$ ),说明  $f_{PV}$  的增加对地表热环境具有降温效应,由回归系数可知,2000、2008、2018 年,  $f_{PV}$  每增加 10%, 会使 LST 相应下降 0.66、0.74、1.09  $^{\circ}\text{C}$ 。

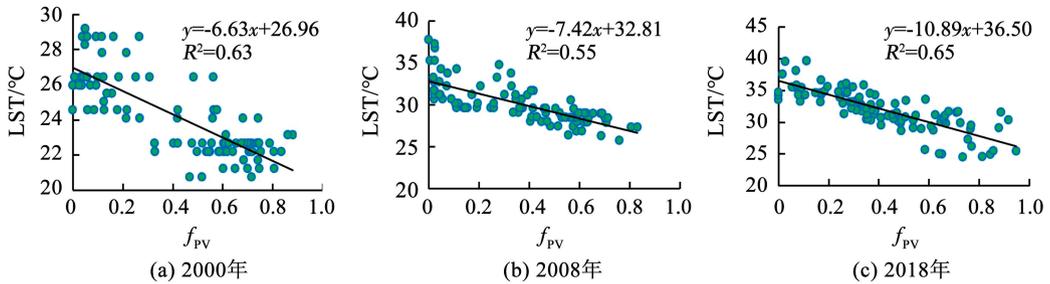


图 11 2000—2018 年  $f_{PV}$  与 LST 回归分析

Fig. 11 Regression analysis of  $f_{PV}$  and LST from 2000 to 2018

### 2.4 地表反照率对地表热环境异质性的驱动作用

2000—2018 年 Albedo 空间分布具有明显的异质性和规律性(如图 12 所示),高值区分布于矿区采场裸岩和排土场裸土等裸露区域,中低值区位于植被和水体。利用 ArcGIS10.2 的叠加分析功能,计算 3 期影像不同下垫面 LST 和 Albedo 均值及排序:矿区采场裸岩 LST 均值 35.29  $^{\circ}\text{C}$  > 排土场矿渣 LST 均值 35.02  $^{\circ}\text{C}$  > 复垦植被 LST 均值 25.25  $^{\circ}\text{C}$  > 水体 LST 均值 21.77  $^{\circ}\text{C}$ ; 矿区采场裸岩 Albedo 均值 0.79 > 排土场矿渣 Albedo 均值 0.68 > 复垦植被

Albedo 均值 0.46 > 水体 Albedo 均值 0.12。

为定量分析地表热环境异质性对 Albedo 变化的响应规律。依托 ArcGIS10.2 软件提取随机点工具以及 SPSS22.0 软件的相关分析功能对 3 期影像的 Albedo 和 LST 反演值进行回归分析(如图 13 所示)。结果表明,2000、2008、2018 年决定系数  $R^2$  分别为 0.35、0.40、0.48, Albedo 与 LST 在 0.01 水平(双侧)呈线性正相关关系( $p < 0.01$ ),说明 Albedo 的增加对地表热环境具有增温效应,但是相较于  $f_{PV}$ , Albedo 和地表温度的相关性较小。由回归系数

可知,2000、2008、2018 年,Albedo 每增加 10%,会使 LST 相应上升 1.09、1.36、1.76 °C。此外,不同地表

覆被对于直接太阳辐射和间接太阳辐射的反射与散射可能对该结果造成一定的干扰。

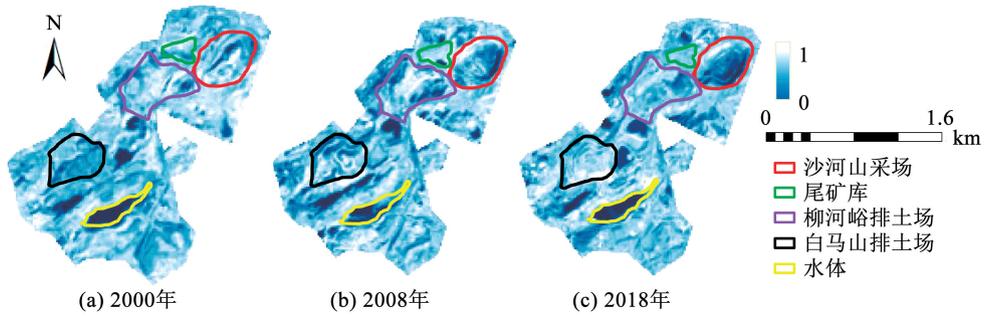


图 12 2000—2018 年地表反照率空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of surface albedo from 2000 to 2018

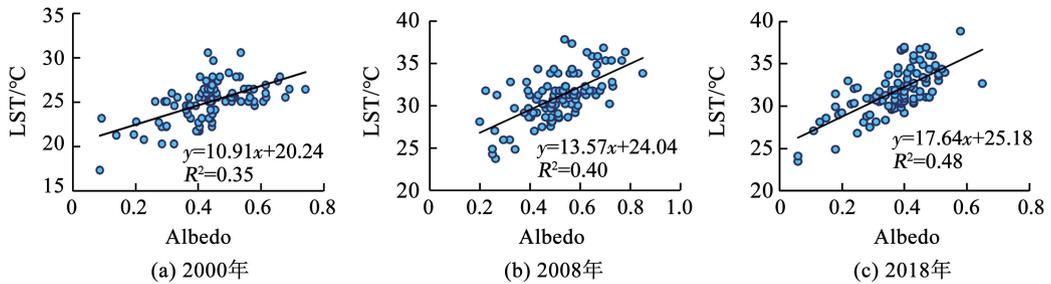


图 13 2000—2018 年 Albedo 与 LST 回归分析

Fig. 13 Regression analysis of albedo and LST from 2000 to 2018

### 3 结 论

1) 研究区地表温度空间分布呈现明显的异质性和规律性,高温区主要分布于北部沙河山采场、中部柳河峪排土场和南部未复垦的白马山排土场,中温区主要位于高温区边缘以及其他裸露地表,低温区主要位于北部已复垦尾矿库和已复垦排土场以及境内绿地和水体。

2) 研究区光合植被覆盖度在 2000—2018 年 19 年间,呈现先下降再上升的变化趋势,相应的高温、次高温和中温区呈现先上升后下降的变化趋势,说明光合植被覆盖度与地表温度呈现负相关关系,并且空间上呈现相反的变化特征。研究区地表反照率在 2000—2018 年 19 年间,呈现先微弱下降再大幅度下降趋势,总体呈现下降趋势,与地表温度 19 年间高温、次高温和中温区的总体呈现下降趋势的变化特征一致,说明地表反照率与地表温度呈现正相关关系,并且空间上整体变化趋势相一致。

3) 光合植被覆盖度和地表温度的回归分析结果表明二者在 0.01 水平(双侧)呈线性负相关关系( $p < 0.01$ ),说明光合植被覆盖度的增加对地表热环境具有降温效应,决定系数  $R^2$  分别为 0.63、0.55 和 0.65,由回归系数可知,2000、2008、2018 年,光合植被覆盖度每增加 10%,会使地表温度分别相应下

降 0.66、0.74、1.09 °C。地表反照率与地表温度的回归分析结果表明二者在 0.01 水平(双侧)呈线性正相关关系( $p < 0.01$ ),说明地表反照率的增加对地表热环境具有增温效应,决定系数  $R^2$  分别为 0.35、0.40 和 0.48,由决定系数来看,相较于光合植被覆盖度,地表反照率和地表温度的相关性较小,由回归系数可知,2000、2008、2018 年,地表反照率每增加 10%,会使地表温度分别相应上升 1.09、1.36、1.76 °C。

4) 地表下垫面覆被类型对地表反照率的分布和变化特征具有较大影响,矿业开采活动使得原有地表覆被遭到破坏,大面积裸露地表出现,改变了地表下垫面性质,在接收同等太阳辐射的条件下,出露的岩石和裸土热容量小,升温更快。并且由于采场出露的裸岩和排土场矿渣具有的高反照率对其周围区域的净辐射损失有重要影响,是造成采场和排土地表温度迅速升高的主要原因。对于矿业开发密集区,今后应采取边开采边复垦的土地整治措施,以达到降低裸露地表面积,提高光合植被覆盖度,进而改善地表热环境高温聚集效应的目的。全球气候变化导致的气温升高也会造成一定程度的地表温度升高,但是如何剥离全球气温上升造成的影响是很难做到的。本文研究弥补了矿业开采导致矿区内部光合植被覆盖改变引起地表反照率时空分布变化,进

而加剧地表热环境异质性分析的不足,有助于人们理解光合植被覆盖度和地表反照率之间潜在的关系。

## 参考文献

- [1] ZHAO Kaiguang, JACKSON R B. Biophysical forcings of land-use changes from potential forestry activities in North America [J]. *Ecological Monographs*, 2014, 84(2): 329. DOI: 10.1890/12-1705.1
- [2] ZHONG Qiang, LI Yin Hai. Satellite observation of surface albedo over the Qinghai-Xizang plateau region [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1988, 5(1): 57. DOI: 10.1007/BF02657346
- [3] 肖登攀, 陶福祿, MOIWO 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  
XIAO Dengpan, TAO Fulu, MOIWO J P. Research progress on surface albedo under global change [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1217. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2011.11.1217
- [4] DICKINSON R E. Land processes in climate models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 27. DOI: 10.1016/0034-4257(94)00062-R
- [5] HANSEN J, NAZARENKO L, RUEDY R, et al. Earth's energy imbalance: Confirmation and implications [J]. *Science*, 2005, 308(5727): 1431. DOI: 10.1126/science.1110252
- [6] ZENG Ning, NEELIN J D, LAU K M, et al. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction [J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1537. DOI: 10.1126/science.286.5444.1537
- [7] PENG Wenfu, ZHOU Jieming, WEN Lujun, et al. Land surface temperature and its impact factors in Western Sichuan Plateau, China [J]. *Geocarto International*, 2017, 32(8): 919. DOI: 10.1080/10106049.2016.1188167
- [8] KUANG Wenhui, DOU Yinyin, ZHANG Chi, et al. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(1): 113. DOI: 10.1002/2014JD022249
- [9] 李娅丽, 汪小钦, 陈芸芝, 等. 福建省地表温度与植被覆盖度的相关性分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(3): 445  
LI Yali, WANG Xiaoqin, CHEN Yunzhi, et al. The correlation analysis of land surface temperature and fractional vegetation coverage in Fujian Province [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(3): 445. DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180316
- [10] AMIRI R, WENG Qihao, ALIMOHAMMADI A, et al. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2606. DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.021
- [11] ATLASKINA K, BERNINGER F, DE LEEUW G. Satellite observations of changes in snow-covered land surface albedo during spring in the Northern Hemisphere [J]. *The Cryosphere Discussions*, 2015, 9(3): 1879. DOI: 10.5194/tdc-9-1879-2015
- [12] 管延龙, 王让会, 姚建, 等. 气候变化背景下天山区域地表反照率特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(2): 351  
GUAN Yanlong, WANG Ranghai, YAO Jian, et al. Features of surface albedo of Tianshan Mountains area under the background of climate change [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(2): 351. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.02.019
- [13] 陈爱军, 曹晓云, 韩琛惠, 等. 2000—2016 年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化 [J]. *气候与环境研究*, 2018, 23(3): 355  
CHEN Aijun, CAO Xiaoyun, HAN Chenhui, et al. Spatial-temporal distribution and variation of land surface albedo over the Tibetan Plateau during 2000—2016 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2018, 23(3): 355. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17113
- [14] 李富平, 夏冬, 李廷忠. 马兰庄铁矿排土场生态重建技术研究 [J]. *金属矿山*, 2010(2): 152  
LI Fuping, XIA Dong, LI Tingzhong. Research on ecological rehabilitation of dump in malanzhuang iron mine [J]. *Metal Mine*, 2010(2): 152. DOI: CNKI: SUN: JSKS.0.2010-02-039
- [15] LIU Chunguang, SHI Jiancheng, WANG Tianxing, et al. Mathematical assessment of the effects of substituting the band radiative transfer equation (RTE) for the spectral RTE in the applications of earth's surface temperature retrievals from spaceborne infrared imageries [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 226. DOI: 10.3390/rs11030226
- [16] VICENTE G S, CUXART J, DANIEL M V, et al. Comparison of three methods for estimating land surface temperature from landsat 8-TIRS sensor data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1450. DOI: 10.3390/rs10091450
- [17] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计 [J]. *国土资源遥感*, 2004, 61(3): 28  
QIN Zhihao, LI Wenjuan, XU Bin, et al. The estimation of land surface emissivity for landsat TM6 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2004, 61(3): 28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-070X.2004.03.007
- [18] IRONS J R, DWYER J L, BARSIS J A. The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 11. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.026
- [19] CUI Yaoping, XU Xinliang, DONG Jinwei, et al. Influence of urbanization factors on surface urban heat island intensity: A comparison of countries at different developmental phases [J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 706. DOI: 10.3390/su8080706
- [20] YANG Chaobin, HE Xingyuan, YAN Fengqin, et al. Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect — a case study of Changchun, China [J]. *Sustainability*, 2017, 9(2): 312. DOI: 10.3390/su9020312
- [21] WANG Guangzhen, WANG Jingpu, ZOU Xueyong, et al. Estimating the fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil from MODIS data: Assessing the applicability of the NDVI-DFI model in the typical Xilingol grasslands [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 76: 154. DOI: 10.1016/j.jag.2018.11.006
- [22] LIANG Shunlin. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4