

基于短波红外的丹霞山岩壁裸露特征*

康诺尧¹, 傅强¹, 向贤哲¹, 刘晋晖², 章桂芳¹,
张珂¹, 刘蔚秋², 杨强³, 师超凡¹

1. 中山大学地球科学与工程学院 / 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 珠海 519082
2. 中山大学生态学院, 广东 深圳 518107
3. 广州大学生命科学学院, 广东 广州 510006

摘要: 丹霞山因红色砂砾岩形成典型的红层地貌, 其裸露岩壁的时空分布及反射率变化(裸露特征)会受到环境因素的影响。本研究通过实地测量岩壁剖面反射率, 提取 Sentinel-2 卫星遥感数据的短波红外波段, 对丹霞山红层岩壁反射率进行量化进而判别裸露岩壁的区域面积变化; 在此基础上, 结合丹霞山整体植被的 NDVI 值和 2018—2022 年间的气候因子数据, 从不同尺度的生物环境和非生物环境多角度探讨丹霞山岩壁裸露特征的时空演变规律。结果表明, 丹霞山裸露岩壁反射率在 MAM 及 JJA 时期较低, 而在 SON 和 DJF 时期的裸露岩壁反射率较高, 即该时期红层明度较高; 丹霞山红层岩壁裸露面积, 在 2018—2022 年间年际变化较小, 季节间变化较大, 在 SON 和 DJF 时期, 即 9 月至次年 2 月岩壁红层裸露面积最大; 长老峰区域裸露岩壁的特征受非生物因素和不同尺度生物因素的共同影响。其中, 裸露岩壁的面积变化特征主要受由气候条件决定的较大尺度植被总体生长状况影响, 而裸露岩壁反射率所指代的颜色特征则主要受水分和微观层面岩壁生物影响。

关键词: 红层岩壁; 裸露特征; 短波红外; 生物环境; 非生物环境; NDVI

中图分类号: P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)02-0026-09

The exposing characteristics of rock wall in Mt Danxiashan based on SWIR

KANG Nuoyao¹, FU Qiang¹, XIANG Xianzhe¹, LIU Jinhui², ZHANG Guifang¹,
ZHANG Ke¹, LIU Weiqiu², YANG Qiang³, SHI Chaofan¹

1. School of Earth Sciences and Engineering / Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resources, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. School of Ecology, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China
3. School of Life Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Mount Danxiashan exhibits a significant red beds landform, which is formed of red sandstones and conglomerates. The exposed rock wall reflectance and regional area changes of Mt. Danxiashan (exposed characteristics) are affected by complex environmental factors. In this study, we quantified the reflectance of the red rock wall of Mt. Danxiashan through field measurements, extracted SWIR from Sentinel-2 satellite remote sensing data, and further identified the area changes of the exposed rock wall. Furthermore, we calculated the NDVI and collected the climate data from 2018 to

* 收稿日期: 2023-06-30 录用日期: 2023-07-17 网络首发日期: 2023-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(42072012, 32070425); 广东国家公园建设专项资金(2021GJGY026); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515012508, 2019A1515010733)

作者简介: 康诺尧(1999年生), 女; 研究方向: 古生物学和古气候学; E-mail: kangny@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 师超凡(1986年生), 女; 研究方向: 古生物学, 陆相无脊椎动物起源、系统演化与地质环境协同变迁; E-mail: shichf5@mail.sysu.edu.cn

2022, aiming to discuss the spatio-temporal variations of characteristics of exposed palisades in Mt. Danxiashan in different scales by combining biotic environments and abiotic environments. Our results show that the reflectance of the exposed rock wall of Mt. Danxiashan is lower in the MAM and JJA, and higher in the SON and DJF, namely the brightness of the red beds is higher during these periods. The area of exposed rock wall varies little among the years from 2018 to 2022 but greatly among seasons, indicating that the exposed area is highest during the SON and DJF. The exposed features in Zhanglaofeng area are jointly affected by abiotic and biotic factors at different scales. The area changes of the exposed rock wall are mainly influenced by the climate-dominated growth of vegetation at a large scale. The color feature indicated by the reflectance of the exposed rock wall is mainly controlled by water and the surface biota at the micro-level.

Key words: red beds; exposed characteristics; SWIR; biotic environment; abiotic environment; NDVI

丹霞地貌,因其独特的红色陆相砂砾岩层而广受关注。广东省丹霞山作为丹霞地貌的命名地,其红层主要由上白垩统丹霞组红色砂岩和砾岩构成,其发育与岩性、构造密切相关(朱诚等, 2015; 彭华等, 2018; 郑秀娟等, 2021)。近10年来,丹霞山红层的研究从集中在微地貌(通过矿物组成、结构构造、岩石强度以及风化作用等来解释局部地貌的成因(Chen et al., 2019))到从矿物学的角度,详细解剖红层红色的致色机理(杨志军等, 2022; He et al., 2022; 胡金涛等, 2023),标志着对丹霞地貌的研究从宏观进入微观,从地貌特征聚焦到岩壁成色。然而,目前对丹霞山岩壁红层明度及空间分布的变化规律及其对环境因素响应的相关研究较少。其中,环境因素可分为生物因素和非生物因素。现有研究中,对非生物环境即气候环境因子的响应研究较多、较广泛,如通过计算净初级生产力(NPP, net primary productivity)或归一化植被生长指数(NDVI, normal difference vegetation index)研究植物生长状况对气候环境的响应(赵巧华等, 2018; 晁明灿等, 2021; 解晗等, 2022; 缪利等, 2023)。

本研究首先从小尺度方面,通过实地测量对丹霞山丹霞组锦石岩段红色岩壁的光谱特征进行研究,旨在通过特定波段的光谱特征量化红层明度,并在此基础上,将研究对象从岩壁剖面拓展到长老峰段整体裸露岩壁,根据2018—2022年哨兵2号(Sentinel-2)卫星数据,基于上述特定的光谱波段从宏观层面判别长老峰区域裸露红层岩壁的面积变化及颜色特征,并结合2018—2022年气候因子(温度、湿度)、归一化植被生长指数等数据从非生物因素和生物因素多角度探讨影响其裸露特征(面积变化、颜色特征)的时空演变因素。

1 研究区概况

丹霞山国家自然保护区位于广东省韶关市仁化县境内,东经 $113^{\circ}36'25''\sim 113^{\circ}47'53''$ 、北纬 $24^{\circ}51'48''\sim 25^{\circ}4'12''$,总面积约 292 km^2 。由于地处亚热带湿润季风气候区,其植被类型丰富,且内部自然生境分化程度高,形成不同尺度的多样化独特小生境,蕴涵着极为复杂的生态系统(陈宝明等, 2008; 王冬梅等, 2008; 宋小晶等, 2017; 何向阳等, 2019; 梁胜等, 2020; 伍利强等, 2021)(图1(a))。

裸露的岩壁陡崖作为丹霞地貌的特征之一,其形成可归因于崩塌造成的岩壁的快速后退,而崩塌则主要受区域岩性和构造运动这两个因素的影响。从区域岩性的角度,丹霞盆地主要出露丹霞组以及长坝组的地层,这两套地层的岩性以砂岩和砾岩为主。相较于长坝组的地层,丹霞组的地层主要出露在地势较高、坡度较大的东部地区,受岩石物理性质以及自身重力的影响,容易发生崩塌。加之丹霞组的第二段因夹有薄层粉砂质泥岩、粉砂岩及砾岩(黄进, 2010)(图1(b)),力学性质相比于丹霞组第一段及第三段较软弱,容易导致差异风化形成层控洞穴(Zhu et al., 2015; 刘鑫等, 2019),软弱岩层上的岩体便会发生破裂并从岩壁上崩塌,导致崖壁后退,形成裸露岩壁(Yan et al., 2016)。从构造活动角度出发,丹霞盆地有大量断层和节理,岩体稳定性较低,此外,这些断层节理也为季节性的大量地表降水提供了天然通道,加快了岩体的侵蚀,一定程度上加剧了崩塌的发生(陈国能等, 1991)。基于上述因素,丹霞盆地所形成的裸露岩壁主要分布在其中部、东部的山区。

长老峰区域广泛出露丹霞组第一段及第二段

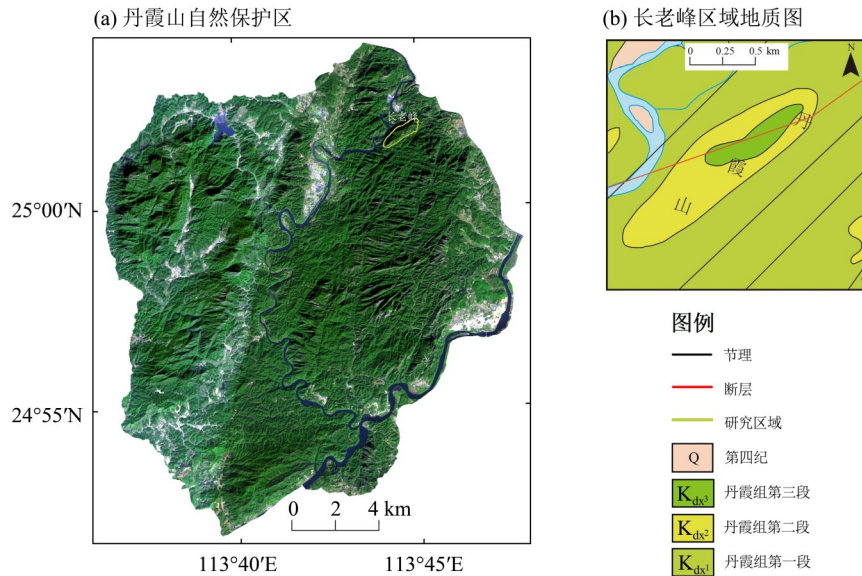


图 1 丹霞山自然保护区(a)及长老峰区域地质图(b)

Fig. 1 Topographic map of Mt. Danxiashan(a) and geological map of Zhanglaofeng area(b)

的岩层,加之有多组节理以及大断裂穿过该区域,使得该区域具有典型的崩塌特征和裸露条件。其中,丹霞山长老峰区域内的剖面陡壁规模大,在卫星数据中更为直观,便于进行不同时空的观测对比。因此,本文选择长老峰区域锦石岩寺段(即丹霞组第二段)裸露岩壁作为研究对象,研究气候环境、生态系统的非生物因素和生物因素对微观层面明度和宏观层面裸露岩壁空间分布的影响。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本文主要对丹霞山长老峰区域裸露岩壁红层剖面的明度及裸露区域的时空变化开展研究,并在此基础上探讨其与环境因素的相关性。丹霞山区域的矢量图源于韶关市丹霞山管理委员会,所用的高程数据来源于ALOS的精度为12.5 m的DEM数据,红层岩壁剖面的光谱数据由实地测量所得。2018—2022年丹霞山整体遥感数据源自分辨率为10 m的Sentinel-2多光谱数据,由于卫星数据自身时间限制,本研究仅选取2018—2022中每一季度的其中一个月作为该季度的代表月份(表1),并通过SNAP 9.0和ENVI 5.3先后进行了大气校正、辐射定标、影像裁剪和植被提取等处理,其中,丹霞山归一化植被生长指数由卫星数据中的波段4和波段8提取计算,岩壁裸露区域的解译和岩壁特殊生物覆被由卫星数据中的波段11提取并进行可视化。2018—2022年气候数据中的温度和湿度指标来自国家气象科学数据中心

表 1 2018—2022年各季度的月份选择

Table 1 Representative months of each quarter from 2018 to 2022

年份	MAM	JJA	SON	DJF
2018	3	8	10	1
2019	3	8	11	1
2020	4	7	10	1
2021	3	7	10	1
2022	4	7	10	1

(<https://data.cma.cn/>)研发的中国全球陆面再分析40年产品(CRA/Land)逐月产品(大气驱动融合产品)。本研究提取了2018—2022年的遥感与气候数据,并根据气候相似性原则以3个月作为最小时间单元将一年划分为4个研究阶段(Shellwood et al., 2006),分别是3~5月(MAM),6~8月(JJA),9~11月(SON),12~次年2月(DJF)。

2.2 研究方法

2.2.1 实地测量 本文采样点的表面反射率,由Spectral Evolution PSR 3500+地物光谱仪实地测量获得(图2),采样时间7~10月,图2中0709样点为7月所测样地编号,1014和1016为10月所测样地编号。实地观测发现,岩壁采样观测点所呈现的明度较低的深色岩壁表面实为被特殊暗色生物覆盖。该暗色岩壁生物群系较为复杂,经过野外采集与室内显微镜下观察,确定以墨绿色的藻类生物覆被为主,经鉴定为Chroococcaceae(色球藻),其分布受水热条件影响较大,喜温暖湿润环

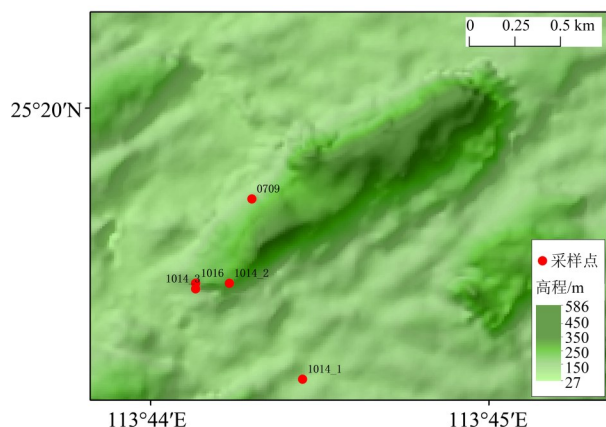


图2 岩壁采样观测点

Fig. 2 Point of sampling palisades

境(李绍炳等, 2011)。

2.2.2 遥感卫星数据 归一化植被指数(NDVI)是由遥感传感器所接收的地物光谱信息推算而得的定量值, 用于反映地表植被状况(李苗苗等, 2004)。其结果区间为-1~1, 越接近1, 植被生长状况越好。其计算公式为

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

其中NIR表示遥感影像中的近红外波段的反射率, RED表示红外波段的反射率。

针对丹霞山植被生长指数与岩壁反射率数据, 本研究应用SNAP和ENVI先后提取了Sentinel-2中的波段4、8和11。其中, 波段4、8分别代表红外波段和近红外波段, 用于计算丹霞山植被的生长指数。此外, 丹霞地貌中的红色岩层主要是由 Fe^{3+} 的富集所造成的(罗曦等, 2021), 在矿物的光谱特征中, 短波红外(SWIR, short wave infrared)对 Fe^{3+} 较为敏感, 因此可以选用短波红外波段的反射率作为量化丹霞山岩壁红层明度的替代指标。

3 结果

3.1 长老峰区域岩壁剖面光谱特征

根据Spectral Evolution PSR 3500+地物光谱仪实测岩壁剖面反射率结果, 发现矿物指标, 尤其是 Fe^{3+} 在短波红外区间内(1 565~1 655 nm)有较好的指示作用(图3), 即 Fe^{3+} 含量越高, 红色明度越高, 岩壁表面反射率越高; 反之红色明度较低, 则岩壁反射率较低, 说明岩壁表面被藻类覆盖。在此基础上, 本文将岩壁红层剖面反射率区间与红层明度的特殊响应关系应用到更大尺度岩壁区域特征的筛选与判别。

3.2 长老峰区域整体岩壁裸露区域特征

基于红色岩壁对短波红外的特殊响应, 本研究选择提取岩壁在波段11的反射率作为红层明度和特殊植被覆盖度(藻类)的替代性指标。利用2018—2022年中每个季度的代表月份的短波红外反射率区间(1%~50%)筛选判别长老峰裸露岩壁时空分布特征(图4)。该裸露特征包括裸露岩壁面积变化和裸露岩壁在短波红外区间反射率(红层明度)变化。

结合哨兵二号卫星影像实际观测到的岩壁范围可知, 应用短波红外反射率区间所判别的岩壁范围与实际观测结果有较好的对应关系(图4)。此外, 区域内整体岩壁裸露时空分布表明, 2018—2022年间裸露岩壁区域主要分布在山体四周。岩壁红层裸露面积在年际间除2022年外没有明显变化, 但季度间裸露面积却存在差异, 且这种差异有一定的规律, 即从MAM到DJF再到次年的MAM, 岩壁的裸露面积呈现先减小后增大再减小的特征。

针对裸露岩壁反射率的变化, 总体上, 长老峰岩壁在MAM以及JJA时期的反射率较低, 而在SON和DJF时期的裸露岩壁反射率通常高于其他季度。而根据上文所论述的反射率和 Fe^{3+} 的响应关系可知, SON和DJF时期较高的反射率表明该时期岩壁红层中致色矿物含量较高, 因而该时期岩壁在人眼可识别的光谱中红色明度较高。

4 讨论

4.1 影响岩壁剖面光谱特征的因素

除上述研究证实的 Fe^{3+} 对短波红外波段的光谱较敏感外, 实际观察所得结果表明, 以色球藻为代表的岩壁生物覆被同样会影响该区间反射率的大小, 如图3(a)所示, 岩壁生物覆被越多, 短波红外反射率越低。此外, 除生物因素外, 以水分为代表的非生物因素会通过岩壁表面形成水膜和通过影响藻类生长从而直接或间接降低短波红外区间反射率。

4.2 影响长老峰区域岩壁裸露特征的因素

4.2.1 非生物因素 针对岩壁裸露面积, 结合解译出的丹霞组锦石岩段(即丹霞组第二段)岩壁红色岩层裸露情况, 可以发现在整体上呈现出从MAM到DJF再到次年的MAM, 岩壁的裸露面积呈现先减小后增大再减小的特征(图4)。通常来说, JJA时期(6~8月)的气候相对于全年其他时期

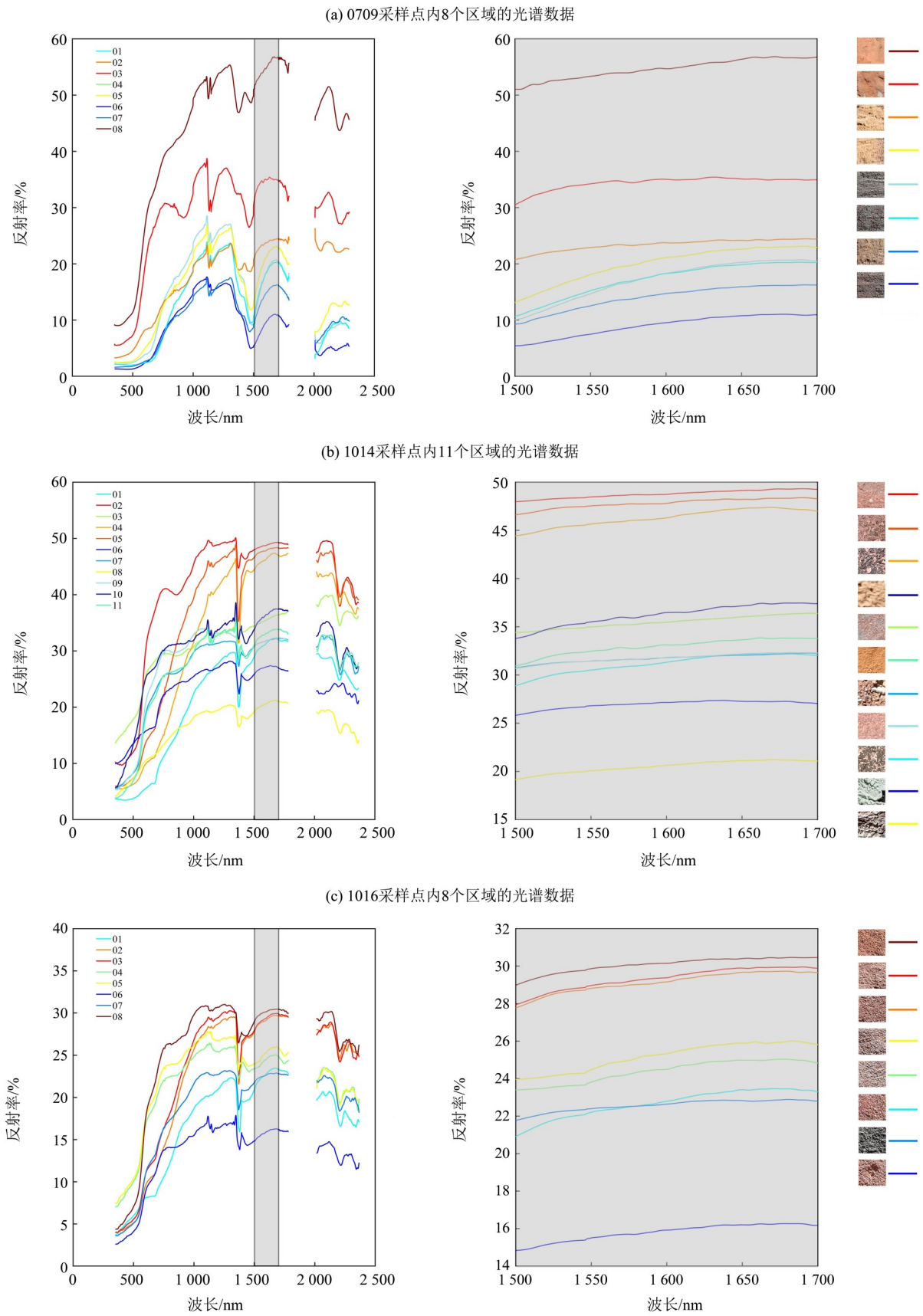


图 3 短波红外岩壁反射率
Fig. 3 Reflectance of palisades in SWIR

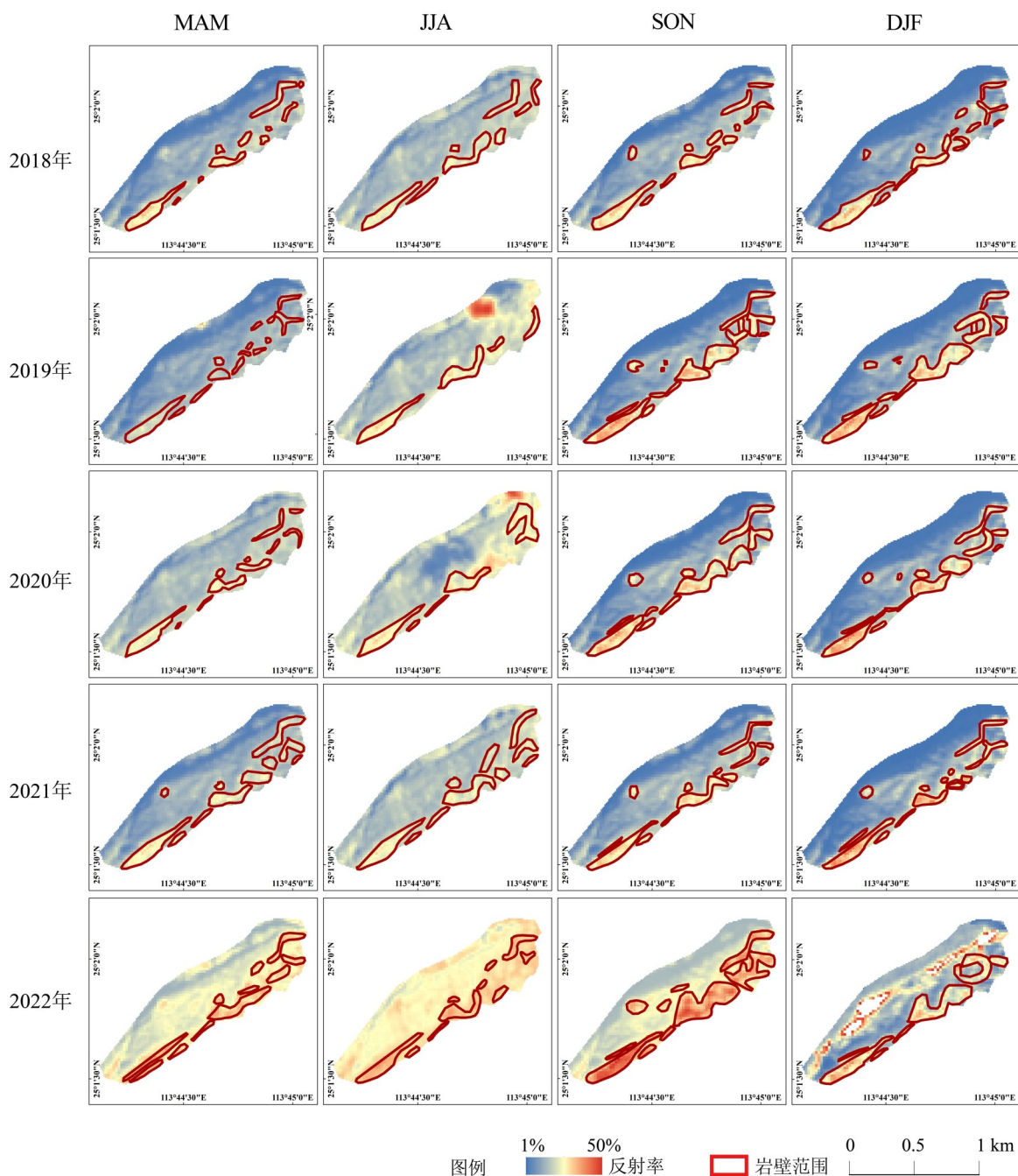


图4 锦石岩段岩壁红层反射率和裸露面积时空变化

Fig. 4 Temporal and spatial variation of reflectance and chrominance on red beds in the Jinshiyan section

较温暖湿润, 植被的生长情况较好, 因此岩壁的裸露面积较小。而相较于 JJA, MAM、SON 和 DJF 时期的水热条件较差, 因此在同一年份间这些时期岩壁的裸露面积大于 JJA 时期。岩壁裸露面积在年际间的变化同样也与气候等非生物环境因素有关。由图 5 可知, 2022 年在湿度、温度等气候因素均低于其他月份的情况下, 其岩壁的裸露区域大于其他年份。该温度与湿度的条件不利于植物生长, 植被覆盖率低, 因而卫星数据所观测的岩

壁的裸露面积略大于其他年份。总体来说, 非生物因素会通过影响生物因素而间接作用于岩壁裸露面积变化。

裸露区域岩壁反射率, 在 DJF 时期较高对应了该时期显著降低的水热条件, 即裸露岩壁在低温干燥环境中反射率较高。一方面, 短期内湿润的大气环境会使岩壁表面形成水膜, 降低岩壁明度, 从而使其在对应的卫星波段中反射率降低。另一方面, 季节性高温湿润气候不仅会加速岩壁表面

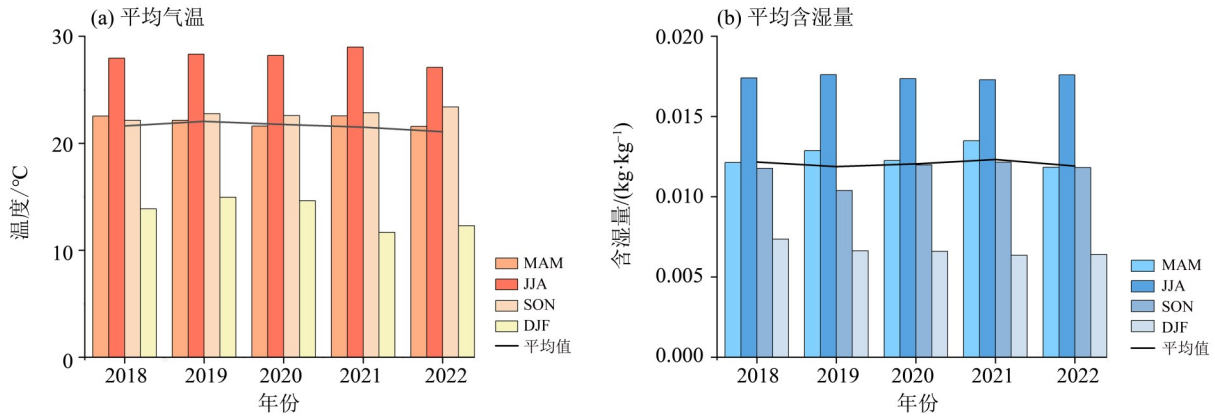


图5 2018—2022年气候环境变化
Fig. 5 The climate change from 2018 to 2022

物理化学风化作用(胡金涛等, 2023; 陈欣, 2022; Gernon et al., 2021), 其引起的色球藻等特殊暗色岩壁生物覆盖度的增加, 也会通过直接覆盖或生物风化等作用使裸露岩壁的红层明度呈现差异化。

4.2.2 生物因素 上述数据表明, 非生物环境因素变化会影响裸露岩壁特征, 此外, 由气候因素所决定的不同尺度的生物因素, 也会直接影响整体岩壁裸露特征。

针对裸露岩壁的面积变化, 较大尺度的长老峰区域植被生长情况会对其产生直接影响。根据丹霞山长老峰区域整体植被的NDVI值(表2, 图6), 不同于2022年, 2018—2021年归一化植被指数年平均值相差较小, 且均值均大于0.6, 表明其生长情况较好且较为稳定。季节间植被生长指数相差较大, 植被生长期集中在一年中的3~11月, 12~次年2月即DJF时期植被生长情况明显较差。该现象与岩壁裸露面积年际变化小, 季节间变化较大的趋势相符。从季度间比较, MAM和DJF的植被生长指数相对较小, 且对应阶段的岩壁裸露面积较大。该现象可归因于MAM和DJF植被生长情况较差, 使得锦石岩寺段植被郁闭度(crown density)降低, 形成了更多的山体裸露区域。而

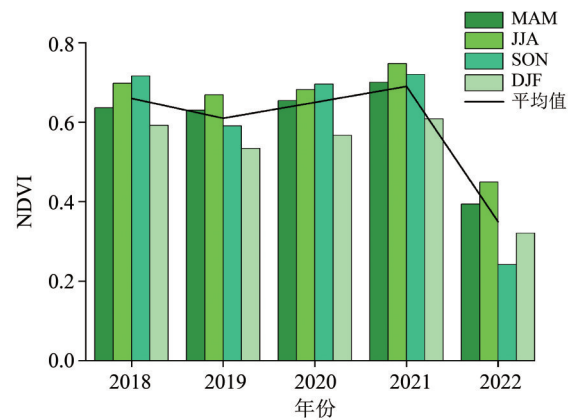


图6 2018—2022年植被生长指数趋势
Fig. 6 NDVI trends from 2018 to 2022

JJA时期, 植被生长指数达到峰值, 植被郁闭度增加, 遮蔽了部分岩壁区域, 红层裸露面积在卫星观测数据中最小。此外, 2022年温度湿度(非生物因素)相比其他年份虽然降幅较小(图5), 但由温湿度小幅度降低所导致的植被生长情况出现了显著变化, 并由此导致了更多裸露岩壁的形成。该现象进一步表明在非生物环境差距较小的情况, 由非生物环境决定的植被生长状况可以放大环境差距, 进一步影响红层裸露面积。

表2 2018—2022年植被生长指数
Table 2 NDVI from 2018 to 2022

年份	MAM	JJA	SON	DJF	平均值
2018	0.64	0.70	0.72	0.59	0.66
2019	0.63	0.67	0.59	0.53	0.61
2020	0.65	0.68	0.70	0.57	0.65
2021	0.70	0.75	0.72	0.61	0.70
2022	0.39	0.45	0.24	0.32	0.35

针对裸露岩壁反射率的变化,微观尺度的岩壁生物的覆被则会对其反射率产生影响。实地采样(图3)及卫星光谱数据表明,波段11涵盖的短波红外区间在暗色岩壁生物覆被的情况下会降低反射率,在人眼可识别的颜色范围内红色明度降低。因而在较为干燥且不适宜藻类生长的DJF时期,岩

壁红色明度最高。

综上所述,长老峰区域裸露岩壁的特征受由气候条件决定的不同尺度生物因素的影响。其中,裸露岩壁的面积变化特征主要受较大尺度植被总体生长状况影响,而裸露岩壁反射率所指代的颜色特征则受微观层面岩壁生物的影响(图7)。

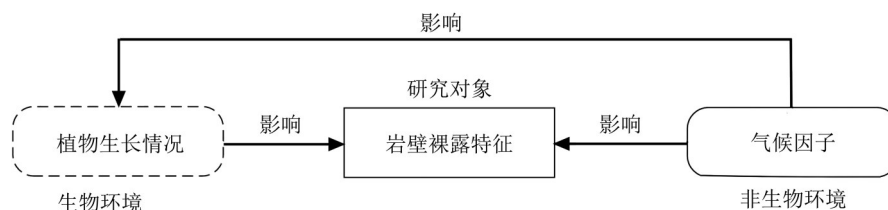


图7 岩壁裸露特征影响模式

Fig. 7 Pattern of influence on exposed features of palisades

5 结 论

本研究基于对丹霞山岩壁剖面的实地采样与观测,结合遥感数据和气候数据,通过多重统计分析,从生物环境和非生物环境影响的角度探讨丹霞山长老峰区域裸露岩壁反射率所指征的红层明度变化及其裸露面积的时空变化规律,获得以下结论:

1) 根据岩壁剖面结果, Fe^{3+} 在短波红外区间内有较好的指示作用,即 Fe^{3+} 含量越高,红色明度越高,岩壁表面反射率越高;反之 Fe^{3+} 含量越低,红色明度越低,岩壁反射率较低。

2) 丹霞山红层岩壁裸露面积在2018—2022年间年际变化较小,季节间变化较大,在SON和DJF时期,即9月至次年2月岩壁红层裸露面积最大。

3) 丹霞山裸露岩壁的反射率在MAM及JJA时期较低,而在SON和DJF时期的裸露岩壁反射率

较高,即该时期较高的岩壁反射率指示了较高的红层明度。

4) 生物环境和非生物环境共同作用影响丹霞山季节间裸露岩壁特征。其中,裸露岩壁的面积变化受水分和整体植被生长的共同影响,整体上呈现出从MAM到DJF再到次年的MAM,岩壁的裸露面积呈现先减小后增大再减小的特征;裸露岩壁的反射率则受控于水分和微观岩壁生物覆被情况,具体表现为,MAM和JJA时期较高的温度湿度使岩壁表面覆被生物大量生长,暗色生物类色球藻的覆被使原有红层反射率降低。相反在较为低温干燥的SON和DJF时期,非生物环境直接反馈为较为干燥的气候会减缓裸露岩壁表面红层的复杂风化作用,使其维持较高的反射率;非生物环境的间接作用表现为低温干燥环境不利于岩壁生物的生长扩张,该暗色岩壁覆被物的减少可一定程度上还原岩壁本来的红层明度。

参考文献:

晁明灿,赵强,杨铁利,等,2021. 基于Landsat8影像的蓝藻水华提取方法对比研究[J]. 大气与环境光学报,16(6): 520-528.

陈宝明,李静,彭少麟,等,2008. 中国南方丹霞地貌区植物群落与生态系统类型多样性初探[J]. 生态环境,17(3): 1058-1062.

陈国能,梁百和,朱素琳,1991. 粤北金鸡岭丹霞地貌发育与地质构造的关系[J]. 第四纪研究,11(3):229-236.

陈欣,2022. 湿润气候区丹霞地貌陡坡上大型蜂窝状洞穴成

因研究——以粤北丹霞山和赣南翠微峰为例[D]. 抚州: 东华理工大学.

何向阳,彭兴文,梁捷,等,2019. 广东丹霞山国家级自然保护区蝙蝠物种多样性调查[J]. 动物学杂志,54(6): 810-814.

胡金涛,杨志军,何旺,等,2023. 广东丹霞山白垩系红色砂岩崖壁上风化洞穴成因的矿物学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,42(1):198-205.

黄进,2010. 丹霞山地貌[M]. 北京:科学出版社.

- 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等, 2004. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 26(4): 153-159.
- 李绍炳, 黄翔鹤, 李长玲, 等, 2011. 温度、光照及海水相对密度对微小色球藻(*Chroococcus minutus*)生长的影响[J]. 广东海洋大学学报, 31(6): 55-60.
- 梁胜, 王梦楠, 胡希军, 等, 2020. 广东南雄丹霞梧桐自然保护区蕨类植物区系研究[J]. 西北植物学报, 40(7): 1230-1236.
- 刘鑫, 郭福生, 陈留勤, 等, 2018. 红层盆地岩性差异对丹霞地貌发育的控制[J]. 山地学报, 37(2): 214-221.
- 罗曦, 杨志军, 张珂, 等, 2021. 广东丹霞山红色成因的矿物学研究[J]. 矿物学报, 41(6): 704-712.
- 缪利, 陆晴, 刘根林, 等, 2023. 1999-2019年青藏高原不同植被类型NDVI时空演变特征及其对气候因子的响应[J]. 水土保持研究, 30(1): 97-105.
- 彭华, 刘盼, 张桂花, 2018. 中国东南部丹霞地貌区小尺度植被分异结构研究[J]. 地理科学, 38(6): 944-953.
- 宋小晶, 唐文乔, 张亚, 2017. 华东武夷山-仙霞岭地区淡水鱼类区系特征及其动物地理区划[J]. 生物多样性, 25(12): 1331-1338.
- 王冬梅, 任文韬, 彭少麟, 等, 2008. 中国东南部丹霞地貌区珍稀濒危保护物种的初步分析[J]. 生态环境, 17(3): 1063-1073.
- 伍利强, 徐隽彦, 张明, 等, 2021. 丹霞山大型真菌物种多样性调查及四个中国新记录种[J]. 食用菌学报, 28(3): 135-146.
- 解晗, 同小娟, 李俊, 等, 2022. 2000-2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 42(11): 4536-4549.
- 杨志军, 都衡恒, 罗曦, 等, 2022. 广东丹霞山红色岩层中白斑成因的矿物学研究[J]. 矿产与地质, 36(1): 129-137.
- 赵巧华, 孙国栋, 王健健, 等, 2018. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响[J]. 湖泊科学, 30(2): 385-393.
- 郑秀娟, 旷红伟, 2021. 大自然的鬼斧神工——雅丹、丹霞与喀斯特[J]. 矿物岩石地球化学通报, 40(4): 992-997.
- 朱诚, 马春梅, 张广胜, 2015. 中国典型丹霞地貌成因研究[M]. 北京: 科学出版社.
- CHEN L Q, GUO F S, LIU F J, et al, 2019. Origin of tafoni in the Late Cretaceous aeolian sandstones, Danxiashan UNESCO Global Geopark, South China. [J]. Acta Geol Sin, 93(2): 451-463.
- GERNON T M, HINCKS T K, MERDITH A S, et al, 2021. Global chemical weathering dominated by continental arcs since the mid-Palaeozoic [J]. Nat Geosci, 14(9): 690-696.
- HE W, YANG Z J, DU H H, et al, 2022. Micro-mechanisms and implications of continental red beds [J]. Minerals, 12(8): 934.
- SELLWOOD B W, VALDES P J, 2006. Mesozoic climates: general circulation models and the rock record [J]. Sediment Geol, 190(1/2/3/4): 269-287.
- YAN L B, PENG H, HU Z, et al, 2016. Stone pillar rockfall in Danxia landform area, Mt. Langshan, Hunan Province, China [J]. Phys Geogr, 37(5): 149-163.
- ZHU C, WU L, ZHU T X, HOU R F, et al, 2015. Experimental studies on the Danxia landscape morphogenesis in Mt. Danxiashan, South China [J]. J Geogr Sci, 25(8): 943-966.

(责任编辑 秦社彩)