

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.02.014

白垩系古沙漠露头遥感特征及其识别方法 ——以湘东南地区红层盆地为例

周丽芸¹, 黄乐清^{1,2,3*}

ZHOU Li-Yun¹, HUANG Le-Qing^{1,2,3*}

1. 湖南省地质调查所, 湖南 长沙 410116; 2. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;

3. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205

1. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410116, Hunan, China;

2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要: 白垩系古沙漠风成砂岩是近年来湖南省新发现的一种沉积类型, 该岩石不仅是特色的旅游资源, 而且是全球关注的储能、储碳的重要目标储集层, 因此对湖南省古沙漠的空间分布规律深入研究意义重大。本文引入遥感技术手段建立古沙漠露头遥感特征的识别及提取方法; 以谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)为主要处理平台, 以Sentinel-2A(哨兵二号)多光谱影像为主要数据源, 从光谱、遥感指数和地形地貌三个方面分析古沙漠露头的遥感特征, 采用随机森林算法进行古沙漠露头的遥感识别。区别于传统的陡直型丹霞地貌, 古沙漠遥感影像色调均匀、连片分布, 植被和山体阴影皆不发育, 具有“顶圆, 坡缓”的地貌特征。同时, 深入分析古沙漠地貌的岩性特征, 结合地质条件辅助约束, 实现古沙漠露头的精准识别。通过上述方法, 本文解译出湖南白垩系丹霞地貌区的多处古沙漠露头, 并从识别结果中选择面积较大的衡阳盆地东缘(渡口地区)和茶永盆地东南缘(郴州市飞天山-高椅岭地区)地区的古沙漠风成砂岩进行了实地验证, 效果理想。本文为研究古沙漠空间分布规律提供了高效的途径, 是遥感技术在古沙漠地质领域的重要应用, 旨在为国内地质学界同行提供技术参考和借鉴。

关键词: 古沙漠; 遥感特征; Sentinel-2A; 谷歌地球引擎; 随机森林算法; 湖南省

中图分类号: P407.8

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)02-0393-11

Zhou L Y and Huang L Q. 2024. Remote Sensing Characteristics and Identification Methods of Cretaceous Palaeo-desert Outcrop: Taking the Red Bed Basin in Southeast Hunan as an Example. *South China Geology*, 40(2): 393–403.

Abstract: The Cretaceous palaeo-desert aeolian sandstone is a new type of sedimentary discovered in Hunan Province in recent years. This rock is not only a characteristic tourism resource, but also an important target reservoir for energy and carbon storage of global concern, so it is of great significance to conduct an in-depth study on the spatial distribution pattern of palaeo-deserts in Hunan Province. In this paper, remote sensing technology is introduced to establish the recognition and extraction method of remote sensing features of palaeo-desert outcrops: With Google Earth Engine (GEE) as the main processing platform and Sentinel-2A

收稿日期: 2024-03-18; 修回日期: 2024-04-16

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30388)、湖南省地质院科研项目(HNGSTP202322)、古生物与地质环境演化湖北省重点实验室开放基金(PEL-202203)

第一作者: 周丽芸(1987—), 女, 高级工程师, 研究方向为遥感地质, E-mail: 1033425183@qq.com

通讯作者: 黄乐清(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为沉积盆地分析与矿产勘查, E-mail: 289773254@qq.com

multi-spectral image as the main data source, by analyzing the remote sensing characteristics of palaeo-desert outcrops from three aspects: spectral, remote sensing index and topography and geomorphology features, and the Random Forest Algorithm was used to identify the palaeo-desert outcrops by remote sensing. Different from the traditional steep and straight Danxia landforms, the remote sensing images of the palaeo-desert are uniform in colour tone, continuously distributed, with undeveloped vegetation and mountain shadows, and with the geomorphological characteristics of ‘rounded tops and gentle slopes’. At the same time, deeply analysing the stratigraphic lithology characteristics of the palaeo-desert, the outcrop of the palaeo-desert is characterized accurately by increasing geological constraints. With the methods above, a number of palaeo-desert outcrops in Danxia landform area of various red bed basins in Hunan Province have been interpreted, and two large areas of palaeo-desert aeolian sandstones in the eastern margin of Hengyang Basin (Dukou area) and the southeastern margin of Chayong Basin (Feitiashan-Gaoyiling area of Chenzhou City) have been verified. This study provides an efficient way to study the spatial distribution law of palaeo-desert, which is an important application of remote sensing technology in the field of geology, aiming to provide technical and geoscience references.

Key words: palaeo-desert; remote sensing feature; Sentinel-2A; Google Earth Engine; Random Forest Algorithm; Hunan province

白垩纪典型温室气候与古构造活动联合综合作用奠定了该时期东亚内陆干旱气候带的格局,导致华南地区晚白垩世广泛发育副热带高压-季风系统-地下水位-造山运动耦合下的风成古沙漠沉积体系(朱筱敏等,2023)。这一风成沉积体系,不仅具有陆相古气候研究的重大科学价值及旅游地质方面的独特美学价值,且在二氧化碳地质封存(CCS)、油气藏储存、铀矿藏储存、深部含水层砂岩压气储能(CAES)等方面亦具有广阔的工程开发应用前景,因此越来越得到了全球地学界的关注(陈清华等,2008;朱锐等,2010;黄华和陈柯伶,2011;Wu C H et al.,2018;黄乐清等,2019;Jiao H J et al.,2020;汤海磊,2020)。

由于固结、成岩作用过程改变了古沙漠原先特有的地形地貌特征,以及资料的缺失(近几年才发现),导致对湖南省内的古沙漠地质遗迹分布规律认识不清(陈荣林,1987),且依靠传统的调查方式仅从地面有限空间难以准确、全面地了解古沙漠的空间分布。遥感技术具有“天眼”优势,能够快速、准确、宏观地获取地质、地表要素信息(田社权,2023),在地质领域得到广泛应用(王润生等,2011;郑雄伟等,2021)。目前,采用遥感技术手段进行古

沙漠信息提取的研究很少,更多的是应用于丹霞地貌,从地形地貌、影纹、色调、阴影、节理构造等多个角度建立遥感解译标志,以目视解译的方式圈划出丹霞地貌集中分布区域(刘林清等,2007;黄宝华等,2010;胡菲菲,2017;汪震和姜勇彪,2019),或根据光谱特征实现丹霞山裸露岩壁的自动化识别(李鹏举等,2016;康诺尧等,2024)。古沙漠在红层物质构成的基础层面与传统丹霞地貌迥异(张长俊和张天刚,1986;陈清华等,2008)。

本研究选择空间分辨率和光谱分辨率适中的Sentinel-2A(哨兵二号)为遥感数据源,以谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)为数据处理平台,参考丹霞地貌解译标志研究古沙漠露头遥感特征,采用随机森林算法和地层岩性约束相结合的方式,进行古沙漠露头的识别研究,为古沙漠调查提供一种新的思路。

1 湖南古沙漠地质背景

华南板块在早白垩世晚期-晚白垩世早期经历了古太平洋板块俯冲与向东后撤的过程(Wu C H et al.,2018),在古太平洋板块俯冲引起的弧后伸展

作用下,华南板块内部形成了一系列NE-SW走向的伸展-断陷盆地(Zhou X M and Li W X, 2000; Suo Y H et al., 2019; Xu X B et al., 2021; Dong S W et al., 2023; 吴学洪等, 2023)。在这一构造背景下,湖南省内形成沅麻、洞庭、长平、醴攸、衡阳、茶永等较大规模的陆相断陷盆地,与断陷盆地沉降相耦合,其旁侧剥蚀区则抬升降起,形成盆-岭构造景观(湖南省地质调查院, 2017)。盆地内主要充填白垩系、古近系的沉积序列,地层单元包括石门组、栏垅组、东井组、神皇山组、罗镜滩组、红花套组、戴家坪组、百花亭组、枣市组等。沉积序列为一套厚度达3 km以上的紫红色的砾、砂、泥质碎屑陆相沉积,俗称“红层”。沉积展布规律上看,从盆地边缘到中心依次沉积紫红色冲-洪积扇相砂砾岩、河流相砂岩和湖相泥岩,其中,还发育有近年来新识别出来的沙漠相风成砂岩等(黄乐清等, 2019)。这些冲-洪积扇相砂砾岩、沙漠相风成砂岩等“红层”岩石常常构成了湖南丹霞地貌的物质基础,控制着丹霞地貌的总体分布及形成演化。不同的岩性组成,叠加后期构造改造,形成的丹霞地貌迥异,如湘东北平江石牛寨丹霞、湘西南崑山丹霞以及湘东南飞天山-高椅岭丹霞等,其丹霞地貌类型与岩石类型之间存在较强的内在联系。

本研究重点验证的湘东南茶永盆地(图1)位于罗霄山脉西侧、郴州市北部、衡阳盆地东部,地形上多为中低山、丘陵,南北长约52 km,东西宽约5~8 km,面积约360 km²,是从早白垩世开始接受陆相红色碎屑岩沉积的红层盆地,主要充填有沙漠相砂岩及冲积扇相砾岩。

2 数据源及处理平台

2.1 数据源

(1)影像数据:本研究选择Sentinel-2A多光谱遥感影像为主要数据,用于全省范围的古沙漠露头研究。Sentinel-2A多光谱遥感影像来源于GEE平台,获取时间为2018年1月1日至2022年12月31日,由多景影像拼接而成,云量控制在5%以内,且重点研究区域未被云层遮挡。影像下载、镶嵌和裁剪均在GEE平台通过编写代码完成。

(2)DEM数据:采用GEE平台提供的NASA-DEM数据产品,该产品空间分辨率为30 m,满足湖南省坡度计算以及古沙漠露头的地形地貌特征分析的需求。

(3)地质数据:本研究收集得到1:25万和1:50万两种尺度下的湖南省地质图。1:25万地质图覆盖了湖南省90%以上的区域,1:50万地质图全域覆盖,主要用于省内白垩系的分布、古沙漠的地层岩性条件研究。

2.2 处理平台

GEE是一个面向全球尺度的主要用于地理空间分析的云端运算平台,充分集成了海量、长时序的多源遥感数据,在线存储了近40余年的遥感卫星影像,涵盖Landsat系列、Sentinel系列、MODIS系列等多源多时相对地观测遥感影像数据(潘霞, 2021)。GEE云平台还拥有强大的算力、丰富的机器学习算法及可视化的操作界面。通过WEB的动态交互式开发环境可实现平台海量数据的调用、大尺度遥感影像分析和处理、计算结果即时显示,以及算法移植。GEE的快速发展不仅打破了传统遥感技术在时间和空间尺度上的限制,在地球科学领域得到广泛应用,推动了地球科学的快速发展(郝斌飞等, 2018; 何旭刚等, 2023; 张仙等, 2023)。

3 古沙漠露头识别方法

3.1 技术路线

本研究采用随机森林算法和地层岩性约束相结合的方式对古沙漠露头进行识别:(1)基于GEE平台进行研究区内Sentinel-2A多光谱影像和DEM的检索和预处理;(2)计算NDVI、NDBI和MNDWI遥感指数,生成坡度数据;(3)从光谱特征、遥感指数特征和地形地貌特征三个方面分析古沙漠露头的遥感特征,以此构建特征变量集,并选取古沙漠露头与背景地物样本;(4)采用随机森林算法进行地表覆盖分类,对分类结果进行精度验证;(5)筛选古沙漠露头信息,以地层岩性作为约束条件,并参考高空间分辨率遥感影像对分类结果中的古沙漠露头进行人工修正;(6)选取其中古沙漠分布较广的两处露头进行野外实地验证。

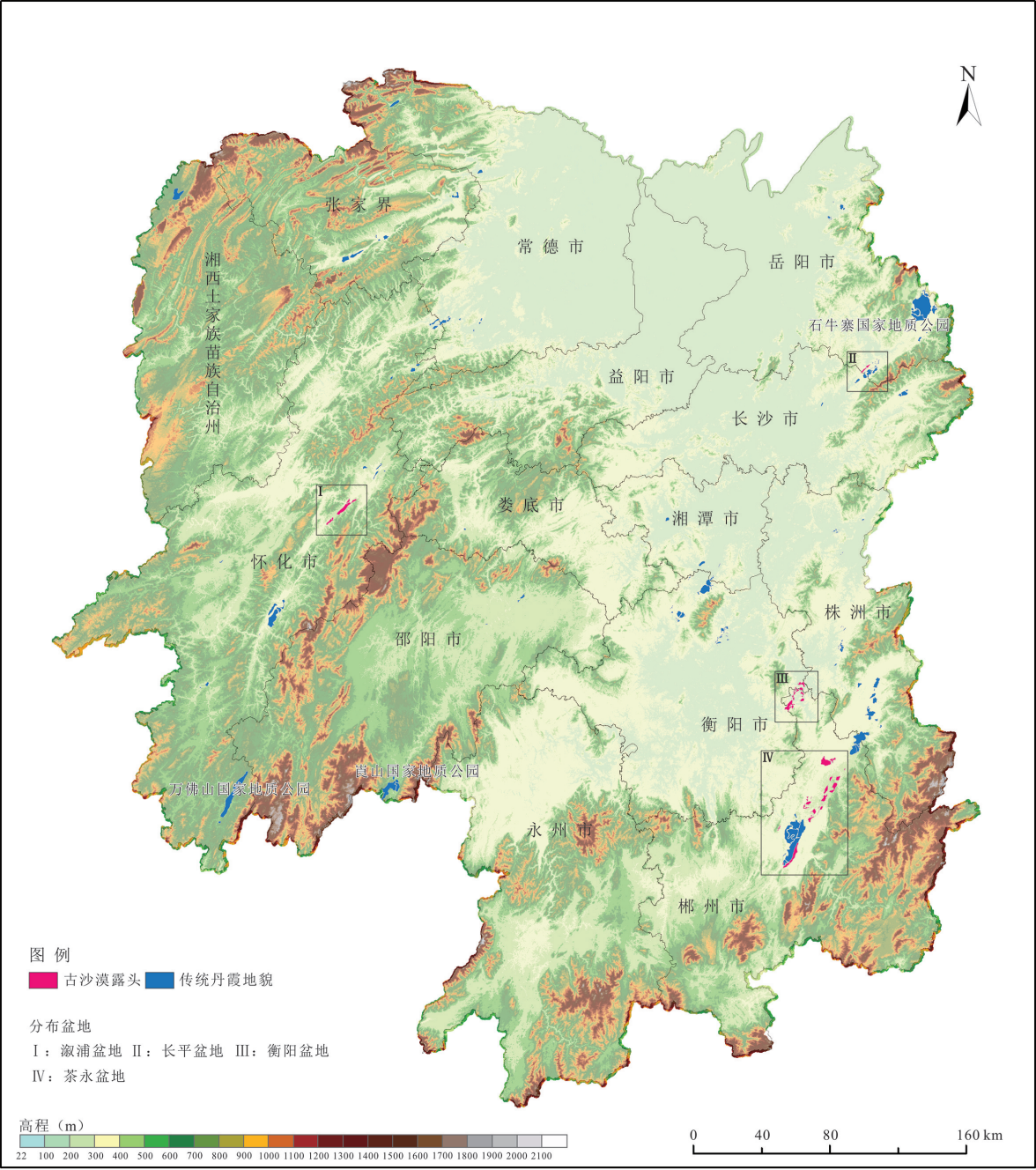


图 1 湖南省白垩系典型红层盆地传统丹霞地貌和古沙漠露头分布图

Fig. 1 Traditional Danxia landform and paleodesert outcrop distribution map of Cretaceous typical red bed basin in Hunan Province

3.2 古沙漠露头遥感特征

3.2.1 遥感特征

(1) 光谱特征

光谱特征是区分不同地物的“指纹”(刘林清等,2007),古沙漠露头在遥感影像上具有特殊的光谱空间分布特征。由于形成环境为干旱和强氧化环境,古沙漠风成砂岩富含 Fe^{3+} 而呈现砖红、棕红、紫

红色(谢渊等,2005;罗曦等,2021),在4、3、2自然色波段组合影像上呈现相近的色调,且在短波红外波段(第11波段)具有较高的反射率(康诺尧等,2024)。因其物质组成以中-细粒长石岩屑砂岩、长石石英砂岩为主,颗粒均匀、质地细腻、分选性好,在影像上呈现连片分布的均匀色调,与周围地物形成明显的界线。

(2) 遥感指数特征

古沙漠砂岩胶结程度偏低,岩体强度偏弱,结构松散、土壤贫瘠,不利于植被生长,地表岩石大面积裸露,呈现独特的裸岩景观(胡晓杰等,2023),归一化植被指数(NDVI)可以有效地识别植被信息(李丽等,2010)。传统丹霞地貌具有陡坡峭壁的基本特征(丁丽雪等,2020),在遥感影像上阴影特别发育,改进的归一化差异水体指数(MNDWI)能够削弱山体阴影的干扰。人造地表在短波红外和近红外的反射率有一定的反差(徐涵秋,2005),归一化建筑指数(NDBI)可减少对居民地、工矿用地、公路等人造地表信息的误判。充分利用上述遥感指数在识别植被、水体和人造地表方面的优势,增加古沙漠露头与背景地物的可分性,提高分类精度。

(3) 地形地貌特征

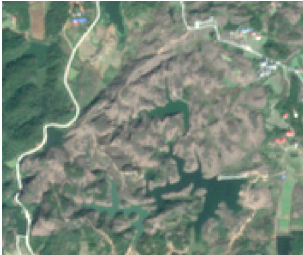
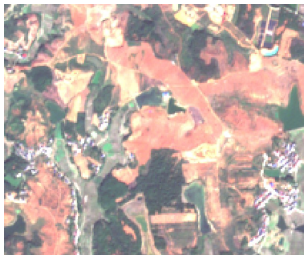
受风力的持续搬运作用,古沙漠形成巨厚层、块状均一的砂体,质体松散、钙质胶结、孔渗较好,

易于风化剥蚀,形成寨(堡)状、拱状、槽状等低缓圆润岩丘型的地貌景观(彭华,2000;黄乐清等,2023),明显区别于水成环境中沉积形成的强抗风化的砂砾岩陡直丹霞地貌(柱状、线状等)。本研究利用 30 m 的 NASADEM 数字高程模型计算获得高程和坡度数据作为古沙漠露头的地形地貌特征。

3.2.2 样本制作

结合研究区的实际情况,将地表覆盖划分为古沙漠露头、耕地、林地、水体、人造地表和裸地六大类(表 1)。由于古沙漠露头与人造地表和裸地存在异物同谱现象,为提高分类精度,参考古沙漠露头的遥感特征和中国科学院空天信息创新研究院 2020 年全球 30 m 地表覆盖精细分类产品 V1.0,并结合高分辨率遥感影像和 DEM 影像进行样本选取。采用目视识别的方式选取样本,样本点共计 1000 个,作为随机森林分类的基础数据,不同类型的样本数见表 2。

表 1 典型地物样本
Table1 Samples of typical land cover

古沙漠露头	耕地	林地
		
水体	人造地表	裸地
		

3.3 古沙漠露头的识别

3.3.1 随机森林分类

随机森林算法是机器学习中集成学习方法的一种,以分类回归树算法为基础,综合 n 棵决策树

的结果,取投票数最多的类作为最终结果,具有良好的抗噪声、非线性拟合能力及泛化能力,常用于地表分类和目标检测(刘坚等,2018;高仁强等,2020;黄建文等,2021;吴润秋等,2021)。

本研究按照 7:3 的比例将选取的样本随机划分为训练样本和验证样本,通过直接调用 GEE 平台提供的随机森林分类函数 ee.Classifier.smileRandomForest,设置相应的参数即可快速实现湖南省地表覆盖分类。特征变量是随机森林模型的重要参数之一,直接影响分类精度,基于研究区内古沙漠露头的遥感特征构建随机森林分类的特征变量集

(范莹琳等,2023)。参数中树的数量(numberOfTrees)通过调用 ee.List.sequence 函数设置步长为 5 的 0~50 的序列进行准确率计算,选择准确率最高的决策数目 45 作为分类参数,袋装比例(bagFraction)设为 0.8。对分类结果进行精度评价,总体精度为 0.84,kappa 系数达到 0.81,精度评价见表 2 所示,说明分类结果可信。

表 2 分类样本数及精度评价
Table 2 Classification sample number and accuracy evaluation

地表覆盖类型	样本数	用户精度	错分误差	生产精度	漏分误差
古沙漠	91	0.97	0.03	0.91	0.09
耕地	211	0.85	0.15	0.84	0.16
林地	235	0.85	0.15	0.94	0.06
建筑物	152	0.81	0.19	0.7	0.3
水体	159	0.95	0.05	0.98	0.02
裸地	152	0.64	0.36	0.64	0.36
总体精度			0.84		
Kappa 系数			0.81		

3.3.2 地层岩性约束

由于传统丹霞地貌和古沙漠均属红色陆相沉积(谢渊等,2005;彭华等,2013),两者具有相似的遥感特征,难以避免误提为古沙漠。然而,两者在物质组成方面迥异,采用地层岩性约束的方式可实现古沙漠露头从丹霞地貌中的准确剥离。

省内丹霞地貌发育的物质基础为陆相沉积的砾岩、砂砾岩和砂岩(陈文光,2012),风成古沙漠为较为纯净的长石石英砂岩和细砂岩,没有砾、泥质颗粒,古沙丘在形成过程中有序的迁移和爬升在地层中形成大型的交错层理、斜层理。白垩系在湖南省内广泛分布,地层岩性信息见表 3。除石门组、栏垅组、罗镜滩组岩性以砾岩为主,发育传统丹霞地貌外,其它地层岩性多以砂岩为主,其中神皇山组、红花套组和百花亭组具有典型的古沙漠环境特征,是参与古沙漠露头剥离的主要岩性地层单位。本研究采用叠加分析方法进行地层岩性约束条件下的古沙漠露头提取。

4 结果与讨论

4.1 古沙漠露头空间分布特征

本研究从光谱特征、遥感指数特征和地形地貌

特征分析了古沙漠露头的遥感特征。古沙漠属红层地貌,在遥感影像上呈现砖红、棕红、紫红色调,色调均匀且连片分布,植被和山体阴影皆不发育。不同于传统丹霞地貌的“顶平、身陡、麓缓”,古沙漠露头呈现“顶圆、坡缓”的地貌特征,且物质组成为较为纯净的砂岩。采用随机森林分类和地层约束相结合的方式能够实现区内古沙漠露头的准确识别。

研究区共提取 41 处古沙漠露头图斑,总面积为 175 km²;参考相关论文对于湖南省丹霞地貌的划分(陈文光,2012;胡菲菲,2017)整理得到 229 处传统丹霞地貌露头图斑,总面积为 799.79 km²。分布情况见图 1。

传统丹霞地貌在湖南省内广泛发育。从地质岩性空间分布来看,传统丹霞地貌分布在省内 14 个白垩系盆地中。其中,茶永盆地出露 255.41 km²,为出露面积之最,呈团块状由南西往北东向沿盆地方向分布;其次为长平盆地,出露面积约 183.78 km²,大部分位于盆地的北东端;洞庭湖盆地出露面积最小,仅 8.05 km²。从行政区划来看,郴州市丹霞地貌出露面积最广,总面积达 209.52 km²;其次为岳阳市,出露面积约 174.41 km²;再次为怀化市,出露面积约 148.38 km²;三者占比达 66%以上。益阳市和

表 3 研究区地层岩性信息
Table 3 The stratigraphic and lithology information of the study area

地质年代	地层	岩性
早白垩世	石门组(K _{1s})	主要由紫灰色砾岩、砂砾岩及杂砂岩或砾砂质泥岩组成,少量分布于沅麻、常桃和衡阳盆地,湘东南地区砂岩中见交错层理
	东井组(K _{1d})	以紫红色钙质泥质泥岩及钙泥质砂岩为主,少量可见于沅麻、常桃和衡阳盆地,湘东南地区岩石中发育水平层理,湘北地区发育水平层理和交错层理,湘西地区砂岩中发育槽状交错层理
	栏垅组(K _{1l})	主要由紫红色砾岩、砂砾岩和少量杂砂岩或砾砂质泥岩组成,广泛分布于沅麻、常桃和衡阳盆地,在湘潭和长平盆地亦有少量分布,湘东南地区岩石局部发育交错层理,湘西地区发育块状层理,湘北地区发育水平层理
	神皇山组(K _{1sh})	主要由棕、褐红色长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩组成,夹杂不同分量的灰绿色泥岩或粉砂岩,在大中型盆地中多有分布,湘东南地区岩石多发育大型板状、槽状交错层理,湘北地区发育水平层理,湘西地区发育水平纹理和交错层理
	会塘桥组(K _{1h})	主要为暗紫红色钙泥质粉砂岩与钙质粉砂质泥岩,在大中型盆地中多有分布,主要发育水平层理
晚白垩世	罗镜滩组(K _{2lj})	主要由紫红色砾岩、砂砾岩和少量混积岩组成,具有较典型的洪积扇砾岩-砂砾岩相特征,湘东南地区发育交错层理、斜层理,湘西地区发育块状层理、交错层理等多种层理
	红花套组(K _{2hh})	主要由紫红色含砾长石石英砂岩、长石石英砂岩夹紫红色薄层泥质砂岩组成,在衡阳盆地东南部厚度较大,湘东南地区和湘北地区砂岩多发育水平层理、交错层理、斜层理等
	戴家坪组(K _{2dj})	主要为紫红色粉砂质泥岩夹薄层钙质粉砂岩,多分布于衡阳、湘潭、株洲、澧攸、常桃、长平盆地,湘东南地区和湘西地区砂岩发育水平层理,湘北地区岩石发育水平层理和斜层理
	车江组(K _{2c})	主要为紫红色泥质粉砂岩与粉砂质泥岩,多分布于衡阳、澧攸、常桃、沅麻盆地,湘东南地区发育斜层理、交错层理
晚白垩世-古近纪	百花亭组(KEb)	主要由紫色、淡紫色砾岩、砂砾岩和含砾长石石英砂岩组成,主要分布在湘潭、长平、岳阳盆地,湘北地区砂岩中发育交错层理

注:岩性描述根据《中国区域地质志·湖南志》(湖南省地质调查院,2017)整理。

永州市未见丹霞地貌出露。省内著名的国家地质公园——平江县境内的石牛寨国家地质公园、新宁县崀山国家地质公园、通道县万佛山国家地质公园,丹霞地貌出露面积分别约为 144.16 km²、51.92 km²和 73.83 km²。

相比于传统丹霞地貌,古沙漠露头在湖南省内仅零星分布,从地质岩性空间分布来看,出露面积从大到小依次为茶永盆地(102.94 km²)、衡阳盆地(39.38 km²)、溆浦盆地(27.52 km²)和长平盆地(5.16 km²),大部分位于湘东南地区,而湘西、湘中地区出露极少。由于湘东南为白垩系分布最广泛、发育盆地最多的地区之一,地势南东高、北西低,且受燕山运动影响强烈,形成多个规模较大的陆相红色断陷盆地,发育大套紫红色中细粒长石石英砂岩,为古沙漠的发育提供了条件。从行政区划来看,古沙漠露头在郴州市苏仙区、安仁县、永兴县和宜章县境内分布最广,出露面积总计约 129.29 km²,占比达 73%以上;其次为怀化市、衡阳市、岳阳市,

出露面积分别为 27.52 km²、13.03 km²、5.16 km²;其它市州未见分布。从整体上看,古沙漠露头集中分布于安仁县渡口乡永乐江两岸和苏仙区高椅岭-飞天山风景区。

4.2 实地调查验证

选取紫红色砂岩集中分布面积较大的安仁渡口乡和苏仙区高椅岭-飞天山丹霞景区进行野外实地调查,采集样品进行室内分析,参考前人对飞天山一带地层的描述以及对衡阳盆地和茶永盆地风成沙漠沉积的研究(陈文光,2012;黄乐清,2019,2023),综合分析表明,这些紫红色砂岩露头区均为典型的古沙漠露头,下面以茶永盆地的飞天山-高椅岭及衡阳盆地的安仁县渡口乡为例(图 2)加以说明。

4.2.1 郴州市飞天山-高椅岭地区古沙漠

飞天山-高椅岭古沙漠位于郴州市苏仙区和资兴市接壤处,覆盖面积约 22.27 km²,由西南方往东北方延伸约 17.8 km,呈新月型分布于茶永盆地东

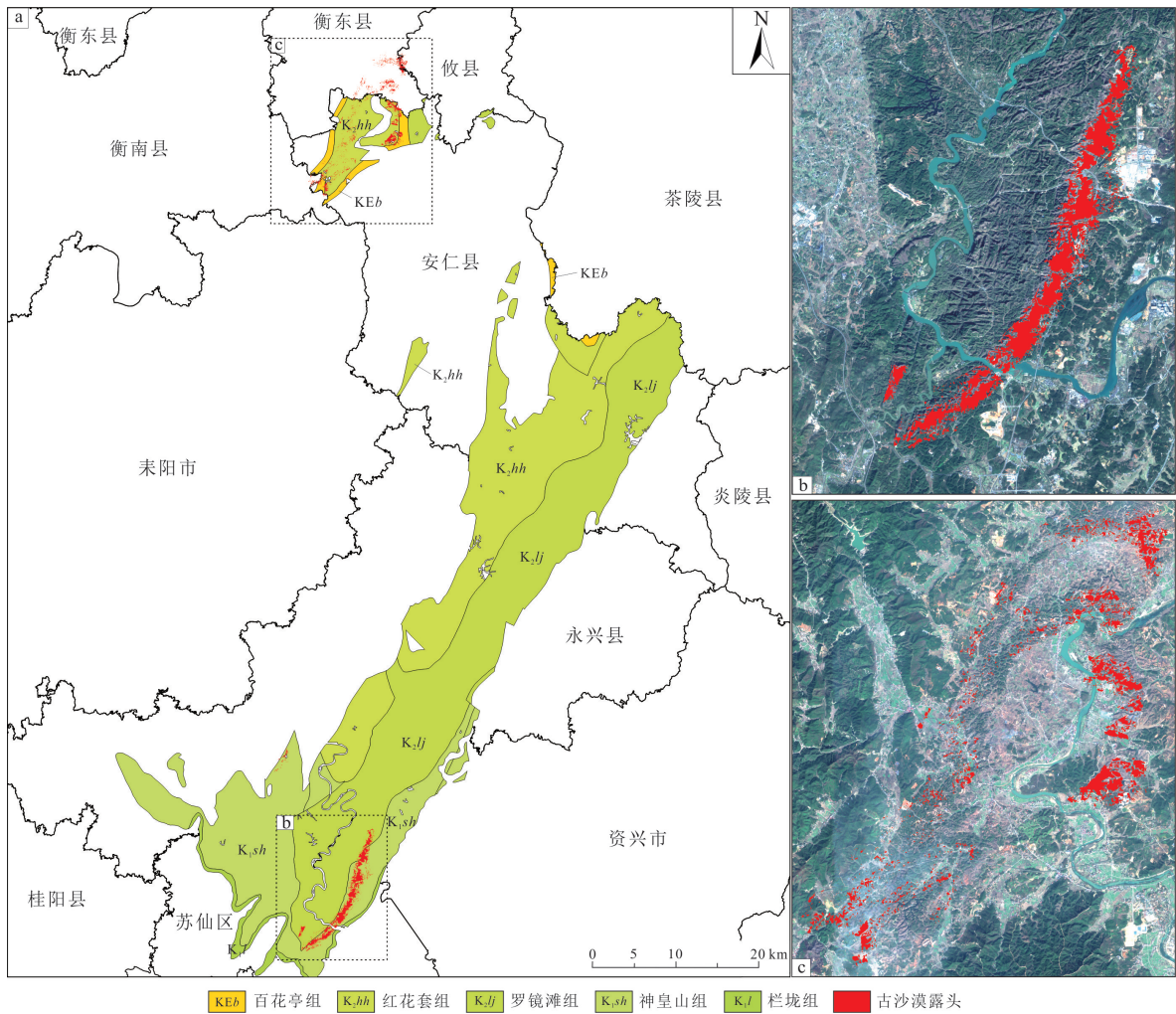


图2 湘东南地区典型古沙漠露头遥感图像特征

Fig. 2 Remote sensing image characteristics of typical palaeo-desert outcrop in southeast Hunan Province
A. 白垩系红层分布及古沙漠露头识别区; B. 飞天山-高椅岭地区古沙漠露头遥感图像特征; C. 渡口地区古沙漠露头遥感图像特征

南端(图3A)。

区域内出露地层为早白垩世神皇山组浅紫红色巨厚层-块状中-细粒岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩,普遍发育大型交错层理,前积层方向稳定,倾向NNE,倾角约23°~30°,垂向上沙丘层层叠置,部分古沙丘出露可达近百余米高,延绵数百米,规模宏大,砂岩分选性较好,颗粒磨圆度较高,属于典型的风成砂丘相沉积(图3B)。由于沙丘相岩石组分(成分、粒径)均匀,加之岩石多以钙质胶结为主,长石等矿物不稳定,容易被侵蚀风化,在流水的溯源侵蚀过程中,多形成低缓的丘状地貌或险峻而狭窄的脊状地貌,如高椅岭著名的蜿蜒的“龙脊”以及“蜥蜴状山岭”,都是古沙丘在遭受风化剥蚀后的自

然塑形。在遥感影像上呈现典型的古沙漠风成砂岩特征,均匀的紫红色调连片分布,纹理光滑细腻,与周围地物有显著区别。不同于河流相砾岩形成的崖壁式高陡型丹霞地貌(图3C),飞天山-高椅岭古沙漠受水流冲刷、侵蚀、切割影响严重,具有沟谷幽深、分水岭狭窄、丹崖密布的特征,具有很高的旅游观赏价值(图3B)。

4.2.2 安仁渡口地区古沙漠

安仁县渡口乡古沙漠位于衡阳盆地东缘,永乐江两侧的丘陵地貌区(图4A),主要出露白垩纪红花套组长石石英砂岩,总面积约39.34 km²。

从影像上来看,古沙漠呈块状散布于盆地之中,色调为均匀的紫红色,纹理结构较为平滑,地势

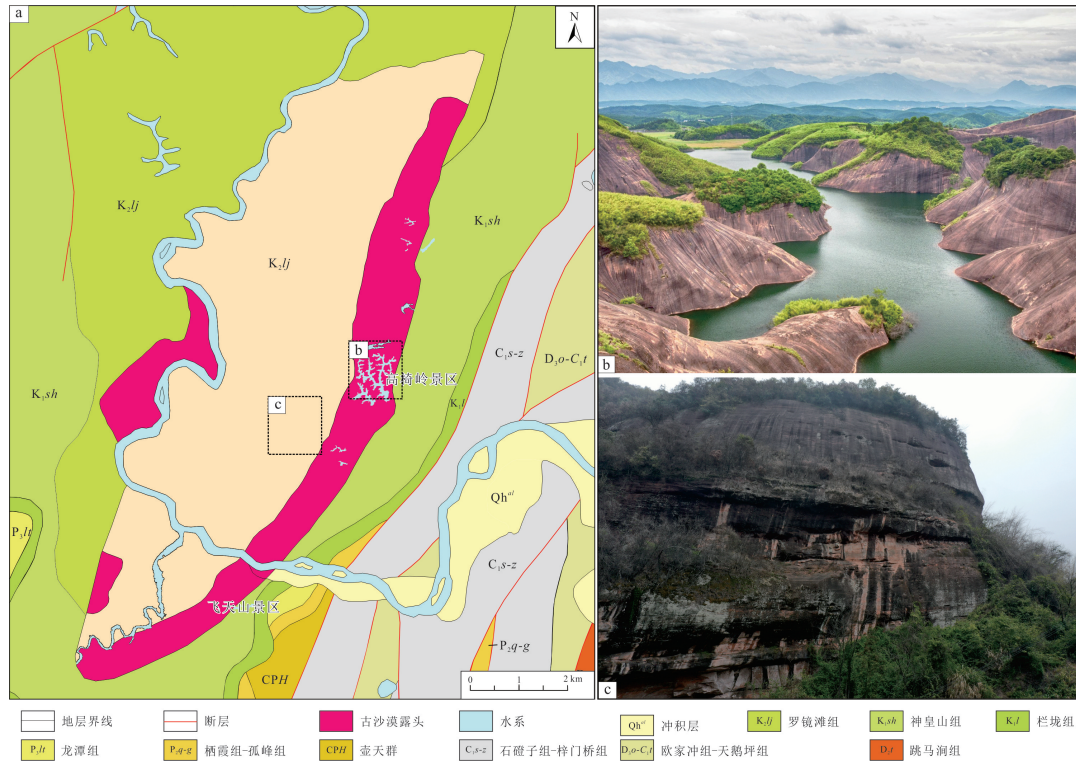


Fig. 3 Outcrop distribution map and field photos of Feitianshan-Gaoyiling palaeo-desert in Chenzhou

A: 飞天山-高椅岭古沙漠露头分布图; B: 高椅岭典型古沙漠露头; C: 高陡型丹霞地貌

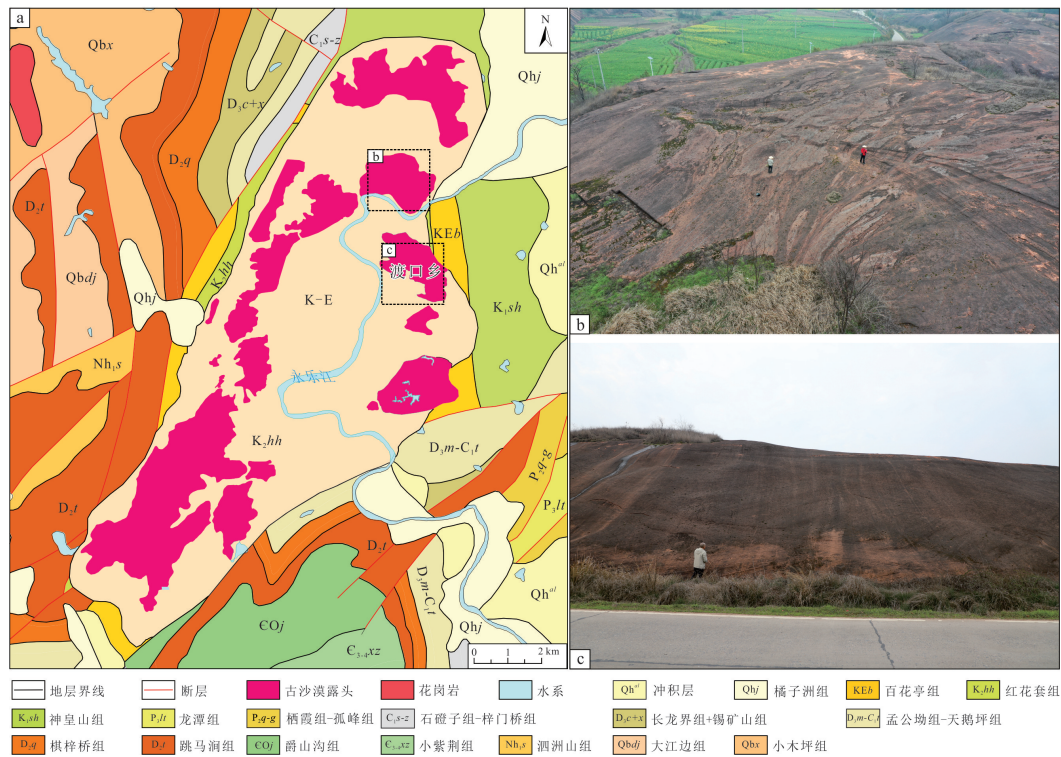


Fig. 4 The distribution and field photos of palaeo-desert in Dukou area of Hengyang Basin

A. 渡口地区及邻区地质简图; B. 渡口地区古沙丘形成的“石漠”型丹霞景观; C. 渡口地区典型的古沙丘露头剖面

低缓,山脊平坦。山体低矮、浑圆,地表切割深,附近发育“丰”字型水系,岩石大面积裸露。在野外可见典型的古沙漠砂岩剖面,见多期的古沙丘爬升,显示出古沙漠的演化过程(图4B)。露头上表现为巨厚层、块状均一的砂体,因容易风化,往往形成低缓、易被改造的丹霞地貌。古沙漠砂岩形成“石漠”型丹霞,见巨型交错层理(图4C),表面光滑、易风化流失,难以形成土壤风化层,故而植被不发育。

5 结论

本文以 Sentinel-2A 卫星影像为遥感数据源,从光谱特征、遥感指数特征和地形地貌特征建立了湖南省古沙漠露头的遥感解译标志,采用随机森林分类算法和地层岩性约束相结合的方式进行古沙漠露头的遥感识别。

(1)古沙漠和传统丹霞地貌均为典型的红层沉积,在遥感影像上呈现砖红、棕红、紫红色调。区别于传统的陡直型丹霞地貌,古沙漠遥感影像色调均匀、连片分布,植被和山体阴影皆不发育,具有“顶圆,坡缓”的地貌特征。

(2)随机森林和地层岩性约束相结合的方法,能够减弱传统丹霞地貌对古沙漠露头提取的影响。根据遥感特征构建随机森林分类特征变量集进行地表覆盖分类,总体精度和 kappa 系数均达到 0.8 以上,分类效果较好,但古沙漠露头提取仍受到丹霞地貌的影响,根据两者在物质组成方面的差异,以神皇山组、红花套组和百花亭组等具有典型古沙漠环境特征的地层进行约束能够提高古沙漠露头识别的准确率。

(3)本研究在省内发现 41 处古沙漠露头区图斑,总面积达 175 km²。野外实地验证表明解译效果理想。本研究结果不仅为湖南省风成沉积的研究提供了宝贵的一手资料,也可作为湖南省地质旅游的科学规划与建设提供参考。

感谢审稿专家和编辑部老师在本文的修改过程中给予的宝贵建议!

参考文献:

- 陈清华,庞飞,史鹏.2008.江苏白垩系古沙漠沉积特征及油气地质意义[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),30(5):161-164+383.
- 陈荣林.1987.江苏及邻区上白垩统赤山组中古沙漠沉积[J].江苏地质,(2):20-23.
- 陈文光.2012.湖南丹霞地貌分布发育特点[A].//中国地质学会旅游地学与地质公园研究分会第27届年会暨张掖丹霞国家地质公园建设与旅游发展研讨会论文集[C].张掖:中国地质学会旅游地学与地质公园研究分会:198-201.
- 丁丽雪,卢友月,付建明,秦拯纬,张遵遵,马丽艳,陈希清.2020.醉美丹霞——崑山[J].华南地质与矿产,36(2):204-211.
- 范莹琳,杜松,赵岳,邱景智,杜晓川,张玉峰,丁宴,宋思彤,车巧慧.2023.基于随机森林算法的煤矸石山信息提取[J/OL].自然资源遥感. <https://link.cnki.net/urlid/10.1759.p.20231201.1103.002>
- 高仁强,陈亮雄,杨静学,秦雁.2020.一种高分影像随机森林变化检测方法[J].测绘科学,45(11):130-138.
- 郝斌飞,韩旭军,马明国,刘一韬,李世卫.2018.Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J].遥感技术与应用,33(4):600-611.
- 何旭刚,买买提·沙吾提,盛艳芳,李荣鹏.2023.基于GEE平台渭库绿洲棉花水分生产率遥感估算[J].干旱区地理,46(10):1632-1642.
- 湖南省地质调查院.2017.中国区域地质志·湖南志[M].北京:地质出版社.
- 胡菲菲.2017.湖南省丹霞地貌特征分析及旅游开发潜力研究[D].湖南师范大学硕士学位论文.
- 胡晓杰,陈灼康,莫罗坚,严朝东,王卫,罗晓莹.2023.基于遥感影像的丹霞山国家级自然保护区森林景观格局分析[J].生态科学,42(2):155-163.
- 黄宝华,郭福生,姜勇彪,刘林清,彭花明.2010.广丰盆地丹霞地貌遥感影像特征[J].山地学报,4(28):500-504.
- 黄华,陈柯伶.2011.江陵凹陷白垩系红花套组沙漠沉积特征[J].特种油气藏,18(3):43-46+137.
- 黄乐清,黄建中,罗来,王先辉,刘耀荣,梁恩云,马慧英.2019.湖南衡阳盆地东缘白垩系风成沉积的发现及其古环境意义[J].沉积学报,37(4):735-748.
- 黄乐清,吴驰华,周丽芸,金妮,彭世良,胡能勇,杨长明,陈杰.2023.湖南郴州丹霞地貌景观特征、成因及演化探讨[J].现代地质,37(6):1680-1694.
- 黄建文,李增元,陈尔学,赵磊,莫冰萍.2021.高分六号宽幅多光谱数据人工林类型分类[J].遥感学报,25(2):539-548.

- 康诺尧,傅强,向贤哲,刘晋晖,章桂芳,张珂,刘蔚秋,杨强,师超凡.2024.基于短波红外的丹霞山岩壁裸露特征[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),63(2):26-34.
- 李丽,童立强,李小慧.2010.基于植被覆盖度的石漠化遥感信息提取方法研究[J].国土资源遥感,(2):59-62.
- 李鹏举,邱骏挺,陈一君,李红英.2016.遥感技术在地质公园与地质遗迹调查评价中的应用-以川南地区为例[J].资源开发与市场,32(5):513-539.
- 刘林清,郭福生,曾晓华.2007.丹霞地貌景观调查的遥感技术应用研究[J].东华理工学院学报,30(3):247-251.
- 刘坚,李树林,陈涛.2018.基于优化随机森林模型的滑坡易发性评价[J].武汉大学学报·信息科学版,43(7):1085-1091.
- 罗曦,杨志军,张珂,王汉雨,都衡恒,何旺.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.
- 潘霞.2021.基于Google Earth Engine云平台下地物覆被类型的遥感影像智能分类方法研究[D].内蒙古农业大学博士学位论文.
- 彭华.2000.中国丹霞地貌研究进展[J].地理科学,20(3):203-211.
- 彭华,潘志新,闫彬彬,Scott Simonson.2013.国内外红层与丹霞地貌研究述评[J].地理学报,68(9):1170-1181.
- 汤海磊.2020.楚雄盆地东北部白垩纪风成沉积特征与古气候研究[D].成都理工大学硕士学位论文.
- 田社权.2023.遥感综合地质解译方法在中尼铁路勘察中的应用研究[J].现代地质,37(4):1054-1064.
- 王润生,熊盛青,聂洪峰,梁树能,齐泽荣,杨金中,闫柏琨,赵福岳,范景辉,童立强,林键,甘甫平,陈微,杨苏明,张瑞江,葛大庆,张晓坤,张振华,王品清,郭小方,李丽.2011.遥感地质勘查技术与应用研究[J].地质学报,85(11):1699-1743.
- 汪震,姜勇彪.2019.江西宜黄盆地丹霞地貌特征分析[J].山地学报,37(6):839-847.
- 吴润秋,胡旭东,梅红波,贺金勇,杨建英.2021.基于随机森林的滑坡空间易发性评价以三峡库区湖北段为例[J].地球科学,46(1):321-330.
- 吴学洪,徐亚东,许笑玮,张黎渊,何妍.2023.湘东南茶永盆地白垩纪-古近纪沉积古地理演化[J].华南地质,39(2):214-234.
- 谢渊,王剑,江新胜,李明辉,谢正温,罗建宁,侯光才,刘方,王永和,张茂省,朱桦,王德潜,孙永明,曹建科.2005.鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征及其水文地质意义[J].沉积学报,23(1):73-83.
- 徐涵秋.2005.基于谱间特征和归一化指数分析的城市建筑用地信息提取[J].地理研究,24(2):311-321.
- 张长俊,张天刚.1986.广东仁化县丹霞山红层内风成砂岩的特征[J].矿物岩石,6(3):51-54+193.
- 张仙,李伟,陈理,杨昭颖,窦宝成,李瑜.2023.露天开采矿区要素遥感提取研究进展及展望[J].自然资源遥感,35(2):25-33.
- 郑雄伟,彭宇,尚坤.2021.基于国产卫星的遥感地质解译能力评估[J].自然资源遥感,33(3):1-10.
- 朱锐,张昌民,张尚锋,施和生,杜家元,余烨.2010.潮汐层偶的砂泥纹层厚度变化规律及其地质意义[J].海洋地质与第四纪地质,30(6):9-14.
- 朱筱敏,陈贺贺,谈明轩,李顺利,秦伟,杨棵.2023.从太平洋到喜马拉雅的沉积学新航程——21届国际沉积学大会研究热点分析[J].沉积学报,41(1):126-149.
- Dong S W, Li J H, Gao R, Cawood P A, Thybo H, Johnston S T, Jiao L Q, Zhang Y Q, Wang J M.2023. Intraplate lithospheric extension revealed by seismic reflection profiling of South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 609: 118100.
- Jiao H J, Wu C H, Juan P R, Sun X M, Yi H S. 2020. Late Cretaceous plateau deserts in the South China Block, and Quaternary analogues; sedimentology, dune reconstruction and wind-water interactions[J]. Marine and Petroleum Geology, 120:104504.
- Suo Y H, Li S Z, Chong J, Zhang Y, Zhou J, Li X Y, Wang P C, Liu Z, Wang X Y, Ian Somerville. 2019. Eastward tectonic migration and transition of the Jurassic-Cretaceous Andean-type continental margin along Southeast China[J]. Earth-Science Reviews, 196:102884.
- Xu X B, Liang C H, Xu Y D.2021.Kinematic analysis of fault-slip data in the Nanling Tectonic Belt and Cretaceous to Paleogene tectonic evolution of the Central South China Block[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 221: 104951.
- Wu C H, Rodríguez-López J P, Liu C L, Sun X M, Wang J Y, Xia G Q, Michael W.2018. Late Cretaceous climbing erg systems in the western Xinjiang Basin: Palaeoatmosphere dynamics and East Asia margin tectonic forcing on desert expansion and preservation[J]. Marine and Petroleum Geology, 93:539-552.
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. Tectonophysics, 326(3-4):269-287.