

· 方法与应用 ·

光谱技术用于恐龙骨骼化石风化监测初探

刘瑞峰¹, 刘海新², 黄卓³, 王集宁¹, 姚英强¹, 宋庆伟³

(1. 山东省地质环境监测总站, 山东 济南 250014; 2. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 化石风化监测一直是化石产地监测和保护工作的核心难题, 光谱技术为监测化石风化提供了可行途径。本文采用美国 ASD FieldSpec 4 便携式地物光谱仪对山东诸城恐龙骨骼化石开展了相关研究。研究结果显示, 不同颜色、不同风化程度的化石在光谱曲线上存在差异, 有明显的识别标识, 其光谱曲线的变化特征, 对后续化石风化监测具有重要的借鉴意义。

关键词: 恐龙化石; 风化监测; 光谱技术; 光谱曲线; 识别标识

中图分类号: Q915.2; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)05-0596-09

A preliminary study of the application of spectral technology to weathering monitoring of dinosaur bone fossils

LIU Rui-feng¹, LIU Hai-xin², HUANG Zhuo³, WANG Ji-ning¹, YAO Ying-qiang¹ and SONG Qing-wei³

(1. Shandong Monitoring Center of Geological Environment, Jinan 250014, China; 2. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: The monitoring of fossil weathering has always been a core problem in the monitoring and protection of fossil producing areas. Spectral technology provides a feasible way for monitoring fossil weathering. In this paper, ASD fieldSpec 4 portable spectroradiometer was used to study dinosaur bone fossils in Zhucheng, Shandong Province, which has been an important site for dinosaur excavation since the 1960. The results show that the fossils with different colors and weathering degrees have different spectral characteristics and obvious identification marks. The changing characteristics of their spectral curves are of great reference significance for the monitoring of fossil weathering in the future.

Key words: dinosaur fossil; weathering monitoring; spectral technology; spectral curve; identification mark

Fund support: Geological Survey and Monitoring Project of China Institute of Geological Environmental Monitoring (JC0101-15); Shandong Agricultural Science and Technology Funding (Forestry Science and Technology Innovation) Project (2019LY010)

收稿日期: 2020-03-07; 接受日期: 2020-06-25; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质环境监测院地质调查与监测项目(JC0101-15); 山东省农业科技资金(林业科技创新)项目(2019LY010)

作者简介: 刘瑞峰(1977-), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质环境监测、地质遗迹调查评价等工作, E-mail: liurufeng@shandong.cn。

我国是古生物化石大国,但古生物化石保护形势十分严峻。2017年底,全国地质遗迹资源摸底调查发现,481处重要化石产地的绝大多数没有得到有效保护;原国土资源部于2014、2016年认定的53处国家级重点保护古生物化石集中产地,已有32处遭到了不同程度的破坏,占总数的60%。重要化石产地监测和保护工作刻不容缓,而监测工作是保护工作的基础和支撑。

目前,我国化石产地的监测工作仍处于探索阶段,未形成全国性的技术标准。根据中国地质环境监测院最新牵头起草的《古生物化石产地监测技术要求(征求意见稿)》,可选择的监测方法包括资源调查性监测、人工巡查监测、自动化监测、视频监测、无人机监测、卫星遥感监测、三维激光扫描监测等,综合运用这些方法可有效监测影响化石产地的自然环境、人为活动等宏观因素。但是,目前还缺乏监测化石风化破坏的有效方法,这是化石产地监测和保护工作的核心难题。

光谱技术是一种新的地物探测技术,它利用特定波段范围的电磁波非接触地对地物进行探测,所获得的地物光谱特征是地物在不同谱段反射电磁波能量大小的表现,是组成地物成分和结构等属性的最直接反映(孙家柄,2013)。地物的电磁波响应特征随波长而变化,当其属性发生变化时,其电磁波谱也会发生相应的变化。因此,测定地物光谱特征可间接判定物体物理或化学特性的变化。该技术以其敏锐的地物探测能力为精准识别地物属性提供了强有力的手段(姜庆虎等,2015)。光谱技术在文物保护、农业、食品等领域已经得到了广泛的应用(王丽琴等,2005;张雷蕾等,2012;刘波等,2016),在地质领域,光谱分析技术被应用于获取岩矿类型、矿物特征及成矿背景等信息(童庆禧等,2016)。

研究表明,恐龙骨骼化石的主要矿物成分是磷灰石、方解石及少量的石英,其化学成分主要为 CaCO_3 、 $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$ 和 SiO_2 (旷红伟等,2013)。恐龙骨骼化石中方解石填充在由磷灰石构成的骨质格架之间的孔隙中,由于碳酸盐容易受到流体的侵蚀,因此已出土的恐龙化石的自然风化现象较为严重(邓建国等,2010)。岩石矿物光谱的产生主要是由于组成物质内部离子与基团的晶体场效应和基团振动的结果,但风化产生的表面覆被层的矿物质,其质地与新鲜岩石的矿物或是相似或是不同,虽然这类

表面层的厚度仅有几微米到几毫米,但它们却控制了整个表面的反射光谱(王珊珊等,2016)。因此,通过测量化石的光谱特征理论上能够对其风化程度进行监测,但过去研究未开展过实际测量工作。

基于此,本文选取山东诸城国家级重点保护古生物化石集中产地的恐龙骨骼化石为研究对象,通过测定不同类型化石在不同风化程度、不同环境条件下的光谱特征,探讨化石风化的光谱响应规律,为化石监测和保护提供借鉴。

1 样本与实验方法

1.1 化石样本

本次实验所用到的5块恐龙骨骼化石样本(图1)均来自于诸城化石产地同一批挖掘的零散化石,化石部位不详。基于目视观察将化石分为深色、浅色以及花色3种类别,其中1号(图1a、1b)和4号(图1g)是从同一块化石上采集下来的,为深色化石;3号(图1e、1f)和5号(图1h)是浅色化石;2号(图1c、1d)是花色化石。各化石样本的质量、尺寸、节理发育情况如表1所示。

本次研究采用美国ASD FieldSpec 4便携式地物光谱仪,其测量波长范围为350~2500 nm,主要包括可见光和近红外波段,光谱分辨率为3 nm(350~1050 nm)和10 nm(1050~2100 nm),光谱采样间隔1.4 nm(350~1050 nm)和2 nm(1050~2500 nm),采样时间100 ms。ASD系列光谱仪具有光谱分辨率高、采样时间短、重复性好等优势,已在相关研究中得到广泛应用(贺洋,2015;代晶晶等,2019;沈强等,2019)。

1.2 实验方法

研究表明,冻融循环(温度和水)是影响化石风化的主要因素之一(杜圣贤等,2015;宋香锁等,2019;张尚坤等,2019;刘凤臣等,2019),因此我们对不同颜色的化石样本分别采用自然及冻融两种风化方式。自然风化的化石样本长期存放在户外,经受高温、低温、降雨、降雪等各种自然天气的影响;冻融风化则采用人工冷冻和自然融化结合的方式进行,首先将化石样本放入自来水中充分浸泡(通常为15分钟)以模拟自然环境下被雨水浸润的过程,然后放入冰箱冷冻,在-18℃温度下冷冻72小时,待化石样本充分冷冻后取出自然融化和充分风干,最后进行光谱测量。自然风化和冻融风化两种方式的

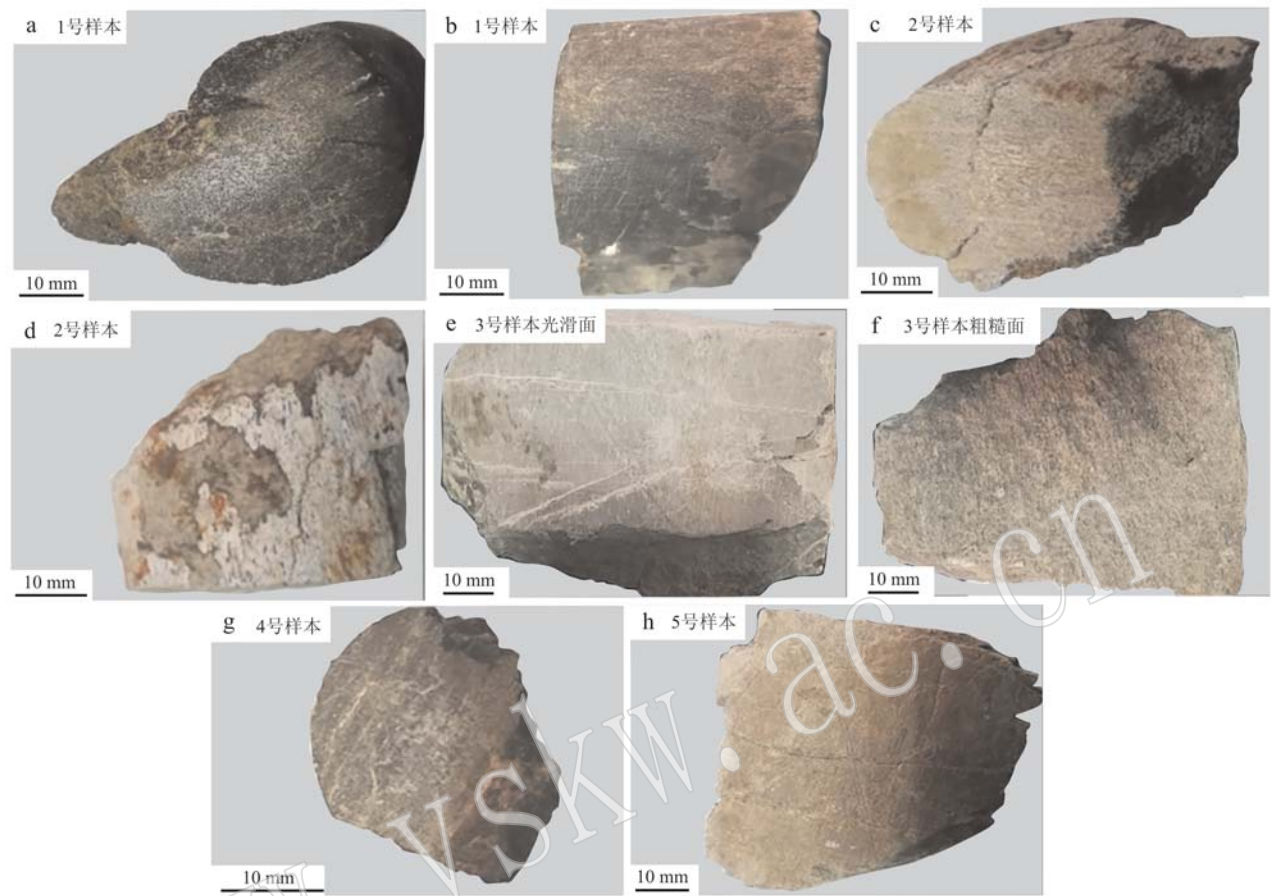


图 1 实验所用的恐龙骨骼化石样本
Fig.1 Samples of dinosaur bone fossils used in the experiment

表 1 化石样本参数

Tabel 1 Parameters of dinosaur bone fossil samples

样本编号	质量/g		尺寸/mm		节理发育情况
	干燥	饱和	直径	高	
1	310	350	60	45	无节理
2	120	140	35	40	无节理
3	540	590	110	60	无节理
4	40	50	30	10	无节理
5	530	600	66	40	无节理

光谱测量均确保化石在相同的温度下进行。1、2 和 3 号化石样本采用冻融风化的方式,而 4 和 5 号样本采用自然风化的方式。

分别对 5 个化石样本进行周期性观测,观测周期为 1 周,持续时间为 1 年,实验分为 3 个阶段,非实验阶段采用封闭的方式进行存放。具体实验阶段如下:

(1) 第 1 阶段: 2018 年 11 月 10 号到 2019 年 1 月 19 号,共 70 天,其中 2018 年 11 月日均气温 8℃,

2018 年 12 月日均气温 2℃,2019 年 1 月日均气温 -0.6℃;

(2) 第 2 阶段: 2019 年 3 月 3 号到 2019 年 6 月 29 号,共 118 天,其中 3 月日均气温 10.5℃,4 月日均气温 17℃,5 月日均气温 24℃,6 月日均气温 27.5℃;

(3) 第 3 阶段: 2019 年 10 月 13 号至 2019 年 11 月 10 号,共 28 天,其中 10 月日均气温 17.4℃,11 月日均气温 8.8℃。

为保证测量的准确性和可靠性,光谱测定在黑暗的环境下进行,其主要技术流程如图 2 所示,具体测试过程如下:

(1) 测量前,采用白板对 ASD FieldSpec 4 光谱仪进行校准,保证测量的可靠性。由于直接测量反射率会受到外界环境以及样本本身特性的影响,要使用已知反射率的白板作为参照物,尽可能排除外界环境对样本光谱曲线测量的影响。

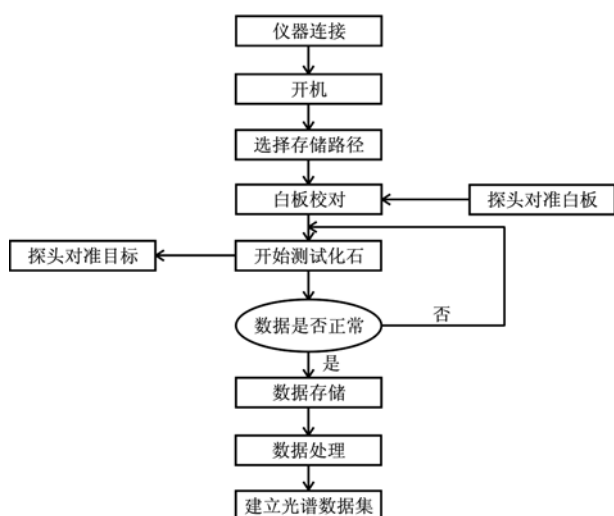


图2 光谱测试操作流程

Fig. 2 Operation flow of spectral measurement

(2) 对每件化石样本进行测量,测量时打开仪器,按照仪器操作规程将探头垂直对准化石样本,测量时间设置为1秒,待光谱曲线稳定后保存,基于测量后的光谱曲线是否与恐龙化石的光谱曲线相似判定测量结果是否正常。为保证测量精度,每个样本测量3次,并通过 ASD FieldSpec 4 自带的光谱曲线处理软件 RS3 软件对3次测量结果进行平均处理后作为本次测量实验的测量结果。

(3) 样本测量过后,再对白板进行测量,确定测量误差。

2 实验结果与分析

2.1 不同颜色化石样本光谱曲线对比

为对比不同颜色化石样本的光谱特征差异,选取第1阶段的实验数据进行对比分析。研究初期对化石样本进行光谱测试,其光谱曲线如图3所示,图中纵坐标轴表示光谱仪测量的反射光谱值 DN(digital number),横坐标轴表示波长。由于1号和4号化石样本来自于同一块化石,在光谱信息采集过程中受光谱采样截面的不同和自然环境的影响,两者存在差异,为更好地表达深色化石的光谱特征,对二者的光谱曲线进行了平均处理。

由图3可以看出,不同化石样本的光谱曲线在近红外波段具有不同特征,主要表现在3个方面:①在700~900 nm处,5号浅色化石样本反射率明显高于其它化石样本。②在1400~1600 nm处,3号和5号浅色化石样本具有明显的吸收谷,而1号和4号深色化石样本均值、2号花色化石样本没有吸收谷。其中,3号化石样本的波谷最为明显,其DN值谷值为27103,其次为5号化石样本,其DN值谷值为30163。③在1900~2000 nm处,所有化石样本都有吸收谷,但3号和5号浅色化石样本吸收特性更为显著,而深色和花色化石样本吸收较弱。其中,1号和4号化石样本均值的DN值谷值为25731,2号化石样本谷值为26254;而3号化石样本的谷值

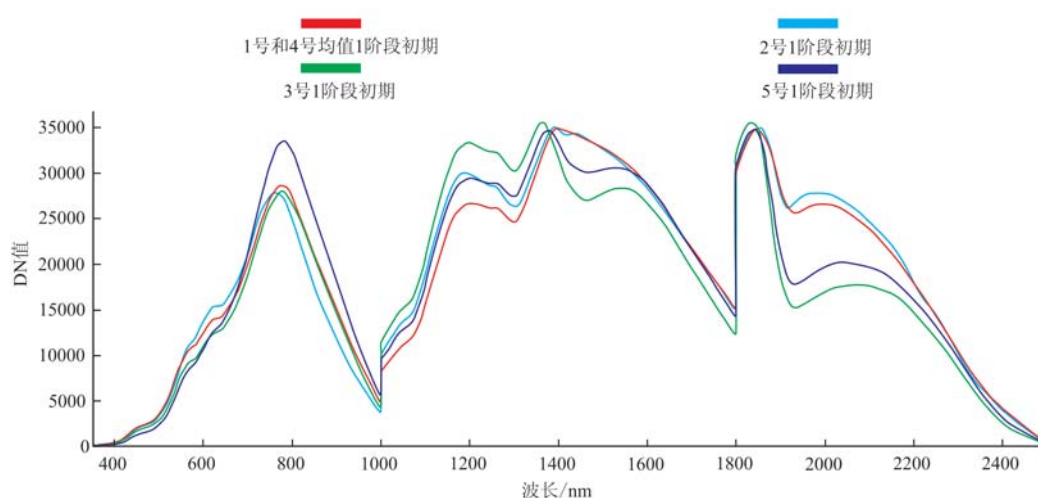


图3 第1阶段初期不同化石样本光谱曲线对比

Fig. 3 Comparison of spectral curves of different fossil samples at the beginning of the first stage

最小为15 217,5号化石样本次之,其谷值为17 711。

综上所述,浅色化石在1 400~1 600 nm处和1 900~2 000 nm处都存在显著的吸收特性,在1 900~2 000 nm处吸收谷最为明显;而花色和深色化石在1 400~1 600 nm没有表现出吸收特性,在1 900~2 000 nm处波谷都不明显。由此初步判定光谱特征和化石样本的颜色有密切关系,而化石的颜色与其所富含的矿物成分有直接关系(姜琴等,2017)。至于在1 400~1 600 nm和1 900~2 000 nm处的光谱特征与化石样本中的矿物成分之间的定量性关系需要进一步研究。

2.2 不同风化周期化石样本光谱曲线对比

风化程度与风化的时间有密切的关系,为对比不同风化时长化石样本在光谱特征上的差异,如前所述,本研究分3个阶段进行。

第1阶段不同化石样本初期和末期光谱曲线对比如图4所示。从图4可以看出,在本阶段,随着风化的进行,所有化石样本的光谱曲线在700~900 nm处的波峰会明显升高,其中,1号化石样本初期峰值为26 473,末期峰值为32 567,相对增长了23.02%,日增幅为87.06(图4a);2号化石样本初期峰值为27 791,末期峰值为32 521,相对增长了17.02%,日增幅为67.57(图4b);3号化石样本初期峰值为27 893,末期峰值为33 284,相对增长了19.33%,日增幅为77.01(图4c);4号化石样本初期峰值为30 767,末期峰值为34 344,相对增长了11.63%,日增幅为51.10(图4d);5号化石样本初期峰值为30 360,末期峰值为33 483,相对增长了10.29%,日增幅为44.61(图4e)。依据日增幅的大小进行排序,从大到小依次为1、3、2、4和5号样本。通过以上分析可知,采用冻融风化方式的化石样本在700~900 nm处的峰值日增长幅度明显高于采用自然风化方式的化石样本。

图5为第2阶段不同化石样本初期和末期光谱曲线的对比。由图5可知,在第2阶段,随着风化的进行,700~900 nm处的峰值同样不断升高。其中1号化石样本初期峰值为34 379,末期峰值为43 397,相对增长了26.23%,日增幅为76.42(图5a);2号化石样本初期峰值为43 791,末期峰值为45 930,相对增长了4.88%,日增幅为18.13(图5b);3号化石样本初期峰值为34 471,末期峰值为37 557,相对增长了8.95%,日增幅为26.15(图5c);4号化石样本初期峰值为39 151,末期峰值为42 240,相对增长了

7.89%,日增幅为26.18(图5d);5号化石样本初期峰值为36 609,末期峰值为38 306,相对增长了4.64%,日增幅为14.38(图5e)。可以看出,与第1阶段相比,第2阶段所有化石样本的日增长幅度均具有降低趋势。同样对其日增长幅度从大到小进行排列,依次为1、4、3、2和5号样本,仅4号样本增长幅度较为异常,其余化石样本在700~900 nm处均表现为冻融风化的日增长幅度高于自然风化的日增长幅度。

第3阶段为3个阶段中最短的,期间不同化石初期和末期光谱曲线对比如图6所示。从图6可以看出,在700~900 nm处,随着风化的进行,其峰值同样在不断升高,其中,1号化石样本初期峰值为44 308,末期峰值为45 450,相对增长了2.58%,日增幅为40.79(图6a);2号化石样本初期峰值为51 373,末期峰值为51 647,相对增长了0.53%,日增幅为9.79(图6b);3号化石样本初期峰值为38 308,末期峰值为38 692,相对增长了1.00%,日增幅为13.71(图6c);4号化石样本初期峰值为51 513,末期峰值为52 146,相对增长了1.23%,日增幅为22.61(图6d);5号化石样本初期峰值为38 506,末期峰值为38 748,相对增长了0.63%,日增幅为8.64(图6e)。和前两个阶段相比,第3阶段化石样本在700~900 nm处峰值的日增长幅度明显降低,日增长幅度按从大小的排序为1、4、3、2和5号样本,与第2阶段相同,同样4号化石样本较为异常。4号化石样本虽采用自然风化方式,但日增长幅度高于采用冻融风化方式的2号、3号化石样本日增长幅度,其原因需进一步实验分析。

实验结果表明,风化使得各类型化石的光谱特征都发生了明显变化。小于100 nm的可见光和近红外波段,所有化石风化之后反射率都有所增加,但程度各不相同;1 000~1 400 nm波段,1、2、4、5号化石风化之后反射率增加,但与前一个波段相比幅度较小;1 400~1 850 nm波段,多数化石反射率变化不明显,而5号化石的光谱在1 400~1 500 nm处风化产生了一个明显的吸收谷;1 850~2 500 nm波段,1号和3号化石风化之后反射率增加,特别是1号化石在1 900~2 000 nm处的吸收特征明显减弱,而2、4、5号化石风化之后反射率都有所降低。其中,风化导致小于1 000 nm的可见光和近红外波段反射率的增加是其共同特征,也是最显著的一个变化特征。

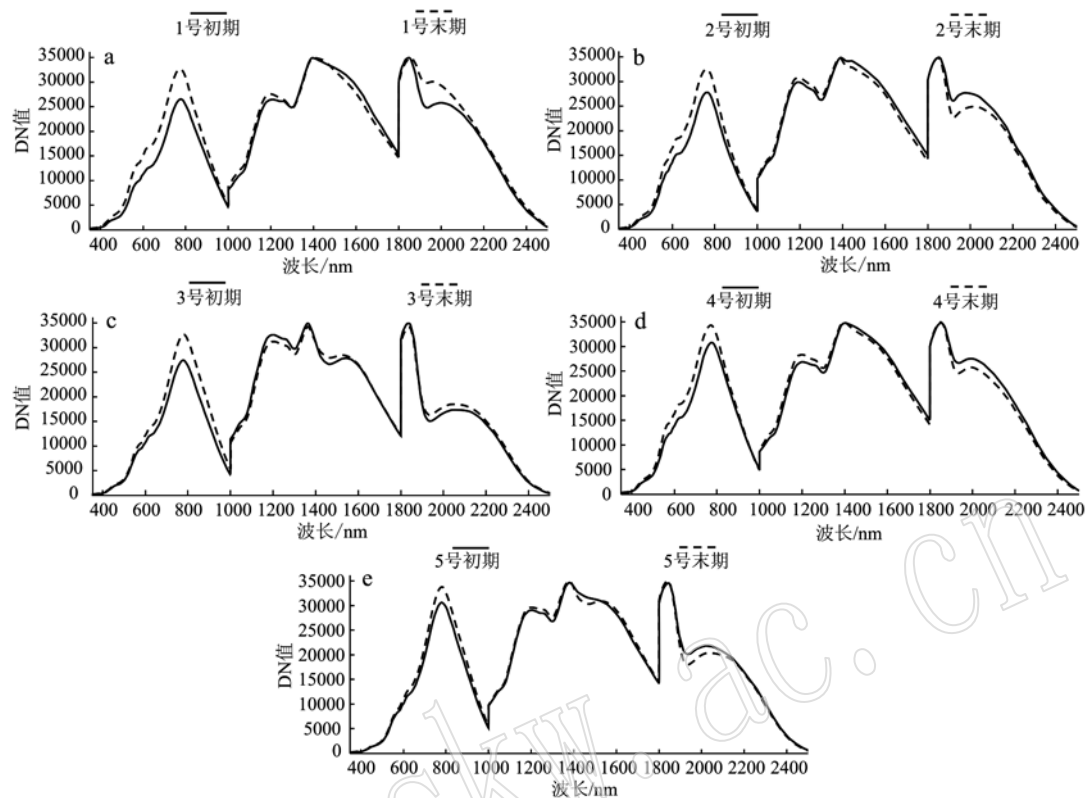


图4 第1阶段不同化石样本初末期光谱曲线对比

Fig. 4 Comparison of spectral curves of different fossil samples at the beginning and end of the first stage

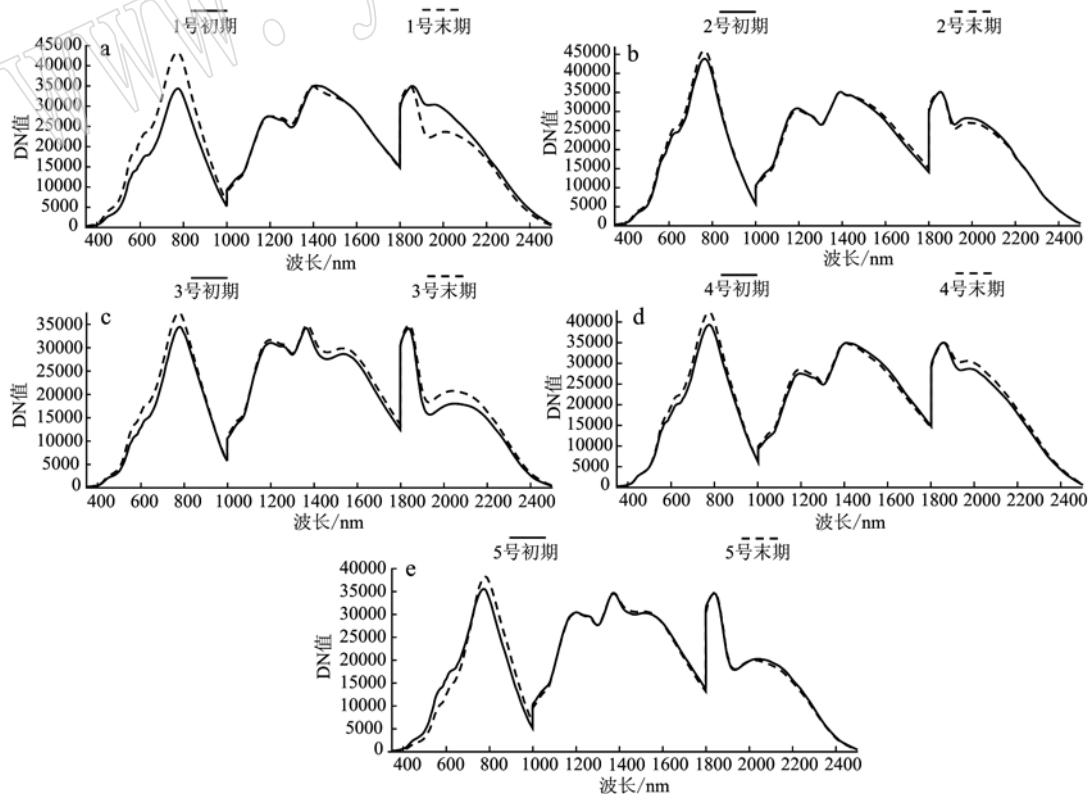


图5 第2阶段不同化石样本初末期光谱曲线对比

Fig. 5 Comparison of spectral curves of different fossil samples at the beginning and end of the second stage

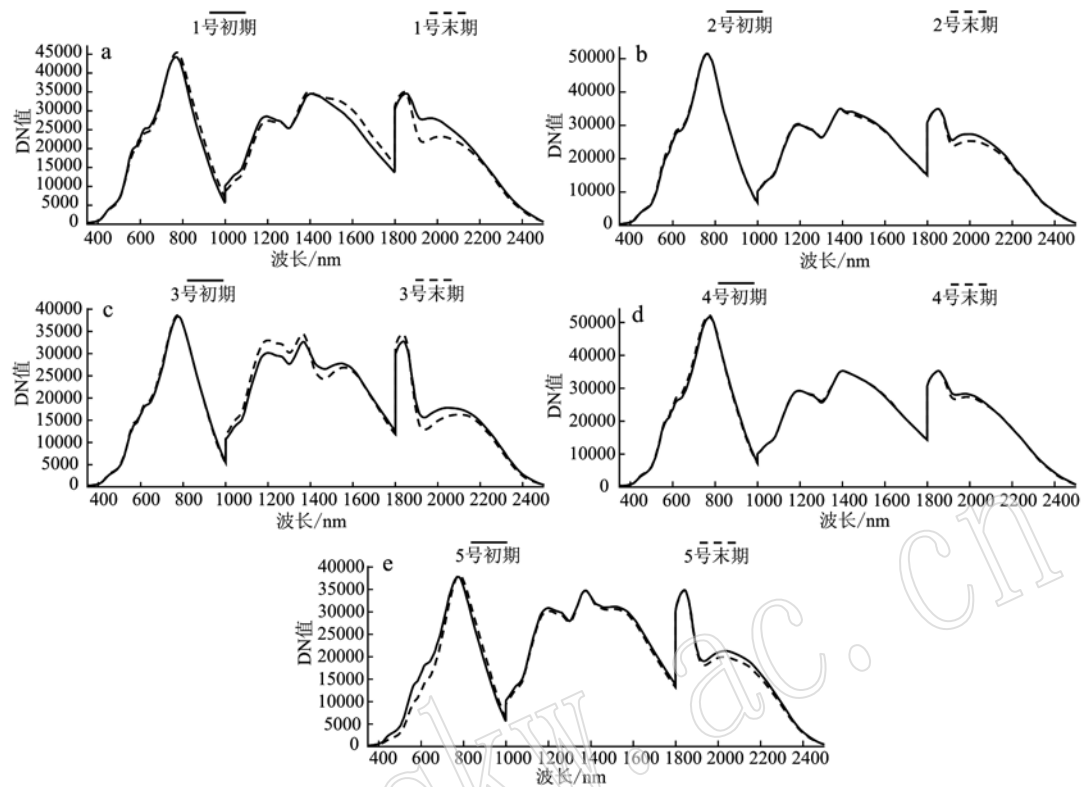


图 6 第 3 阶段不同化石样本初末期光谱曲线对比

Fig. 6 Comparison of spectral curves of different fossil samples at the beginning and end of the third stage

对 3 个阶段的实验进行统计分析发现,化石样本在暂停实验阶段,虽采用密封的方式存储,但未隔离空气,仍存在风化,故每一阶段的初期峰值比前一阶段的末期峰值高;随着实验的进行,所有化石样本在 700 ~ 900 nm 处峰值均在不断升高(表 2)。总体来看,所有化石样本光谱在 700 ~ 900 nm 处峰值的日增长幅度是逐渐降低的。

表 2 不同化石光谱曲线在 700 ~ 900 nm 处峰值增长率分析

Table 2 Growth rate analysis of the peak at 700 ~ 900 nm for the spectral curves of different fossils samples

化石 编号	第 1 阶段		第 2 阶段		第 3 阶段	
	相对增 长率	日增长 幅度	相对增 长率	日增长 幅度	相对增 长率	日增长 幅度
1	23.02%	87.06	26.23%	76.42	2.58%	40.79
2	17.02%	67.57	4.88%	18.13	0.53%	9.79
3	19.33%	77.01	8.95%	26.15	1.00%	13.71
4	11.63%	51.10	7.89%	26.18	1.23%	22.61
5	10.29%	44.61	4.64%	14.38	0.63%	8.64

2.3 不同风化方式化石样本光谱曲线对比

本研究采用自然风化和冻融风化两种风化方

式,为有效对比两种风化结果在光谱上的表征,在实验开始前,将同一块化石分为 1 号和 4 号化石样本,1 号进行冻融风化,4 号采用自然风化。在光谱信息采集过程中由于受光谱采样截面的不同和自然环境的影响,二者首期光谱曲线存在明显差异,但不影响两者的对比分析。图 7 为 1 号和 4 号化石样本在整个实验阶段初期和末期的光谱曲线对比结果。由图 7 可知,在实验初期,1 号和 4 号化石样本的光谱曲线相似,经过 3 个阶段的实验后,在小于 1 000 nm 的可见光和近红外波段,1 号和 4 号化石样本的 DN 值均有明显升高的趋势,尤其是峰值的变化最为明显;1 号化石样本在 700 ~ 850 nm 处的峰值由 26 473 上升到 45 450,增长了 71.76%;4 号化石则由 30 767 上升到 52 146,增长了 69.49%;4 号化石样本的相对增长率低于 1 号化石样本。另外,在 1 000 ~ 1 300 nm 处,1 号和 4 号化石样本的 DN 值均呈现上升趋势,增长比例分别为 3.4% 和 8.5%,4 号化石样本的相对增长率明显高于 1 号化石样本。在 1 850 ~ 2 200 nm 处,1 号化石样本 DN 值呈现明显的下降趋势,下降比例为 12.36%;而 4 号基本不变。这也反映出化石风化前后光谱特征变化的复杂性。

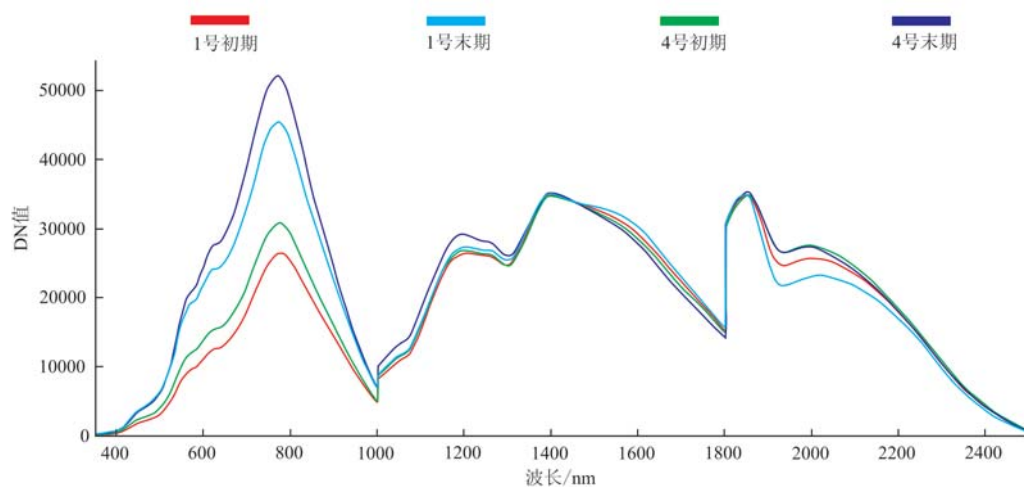


图7 1号和4号化石实验初期和末期的光谱曲线

Fig. 7 Spectral curves of fossils No. 1 and No. 4 at the beginning and end of the experiment

由上述分析可知,两种不同风化方式对同样一块化石进行实验,其光谱曲线表现为不同的变化特征,最直接的表现就是其增长的幅度不同,且区别很明显。

3 结论

本研究基于 ASD FieldSpec 4 光谱仪探讨了不同颜色、不同风化方式的化石样本随着风化的进行,其光谱曲线的变化特征,为后续探讨化石风化提供了借鉴。主要结论如下:

(1) 由于化石中的矿物成分不同,化石表现的颜色有明显的差异,不同颜色化石样本在光谱曲线上也存在差异,主要体现浅色化石在 1 400 ~ 1 600 nm 处和 1 900 ~ 2 000 nm 处存在明显的波谷,而花色和深色化石在 1 400 ~ 1 600 nm 处不存在波谷,在 1 900 ~ 2 000 nm 处的波谷不明显。

(2) 700 ~ 900 nm 处波峰的高低和风化程度有关,且随着风化程度的增加,其峰值逐渐升高,但日增长幅度降低。

(3) 和自然风化相比,冻融可加快风化的速度,这在光谱特征上有明显的反映。

References

Dai Jingjing, Wang Denghong and Ling Tianyu. 2019. Quantitative estimation of content of lithium using reflectance spectroscopy [J].

Remote Sensing Technology and Application, 34(5): 992 ~ 997 (in Chinese with English abstract).

Deng Jianguo, Peng Guangzhao, Jin Yongzhong, *et al.* 2010. Study on the characterization of dinosaur fossils and their surrounding rocks from Zigong [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 27(1): 192 ~ 196 (in Chinese).

Du Shengxian, Zhang Shangkun, Yu Xuefeng, *et al.* 2015. Analysis and study on TM coupling method to weathering effect of dinosaur fossil [J]. Shandong Land and Resources, 31(10): 65 ~ 70 (in Chinese).

He Yang, Xu Tao and Song Yun. 2015. Application of in-situ measured spectra data by ASD FieldSpec3 on lithologic classification in Shuimo-Dahe area [J]. Journal of Geomechanics, 21(1): 21 ~ 29 (in Chinese with English abstract).

Jiang Qin, He Qing, Zheng Liugen, *et al.* 2017. Mineral and elemental composition of Late Cretaceous dinosaur eggs in Qiyunshan area, Anhui Province and its implication for palaeoenvironmental analysis [J]. Rock and Mineral Analysis, 36(4): 340 ~ 349 (in Chinese with English abstract).

Jiang Qinghu, Tong Fang, Yu Mingzhu, *et al.* 2015. Hyperspectral technique: An opportunity in ecology [J]. Plant Science Journal, 33(5): 633 ~ 640 (in Chinese with English abstract).

Kuang Hongwei, Xu Kemin, Liu Yongqing, *et al.* 2013. Geochemistry and taphonomy of Late Cretaceous dinosaur bonebeds in Zhucheng, Eastern Shandong, China [J]. Geological Review, 59(6): 1 001 ~ 1 023 (in Chinese with English abstract).

Liu Bo, Fang Junyong, Liu Xue, *et al.* 2016. Research on crop-weed discrimination using a field imaging spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 30(7): 1 830 ~ 1 833 (in Chinese with English abstract).

- Liu Fengchen, Yu Xuefeng, Jia Chao, *et al.* 2019. Effect of coupling of temperature field and seepage field on weathering damage of dinosaur fossils[J]. *Shandong Land and Resources*, 35(5): 43 ~ 49 (in Chinese with English abstract).
- Shen Qiang, Zhang Shiwen, Ge Chang, *et al.* 2019. Rapid identification and enumeration of common pathogens in yogurt using hyperspectral imaging[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(4): 224 ~ 230 (in Chinese with English abstract).
- Song Xiangsuo, Zhang Shangkun, Jia Chao, *et al.* 2019. Study on weathering damage mechanism of dinosaur fossils by freeze-thaw cycle[J]. *Shandong Land and Resources*, 35(5): 62 ~ 65, 72 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiabing. 2013. *Principles and Applications of Remote Sensing* (3rd Edition)[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 313 (in Chinese).
- Tong Qingxi, Zhang Bing and Zhang Lifu. 2016. Current progress of hyperspectral remote sensing in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 689 ~ 707 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liqin, Liang Guozheng, Dang Gaochao, *et al.* 2005. Studies on relics conservation by diffuse reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 25(8): 1 293 ~ 1 296 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shanshan and Zhou Kefa. 2016. Influence of spectral characteristics of rock mineral surface on geological hyperspectral remote sensing [A]. *Proceedings of the 15th National Symposium on Mathematical Geology and Geoscience*[C] (in Chinese).
- Zhang Leilei, Li Yongyu, Peng Yankun, *et al.* 2012. Determination of pork freshness attributes by hyperspectral imaging technique [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(7): 254 ~ 259 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shangkun, Yu Xuefeng, Jia Chao, *et al.* 2019. Study on main factors affecting weathering damage to dinosaur fossils and surrounding rocks and weathering mechanism[J]. *Shandong Land and Resources*, 35(3): 25 ~ 31 (in Chinese).
- 量反演研究[J]. *遥感技术与应用*, 34(5): 992 ~ 997.
- 邓建国, 彭光照, 金永中, 等. 2010. 自贡地区恐龙骨骼化石及围岩特征的研究[J]. *光谱实验室*, 27(1): 192 ~ 196.
- 杜圣贤, 张尚坤, 于学峰, 等. 2015. 恐龙化石风化效应的 TM 耦合分析研究[J]. *山东国土资源*, 31(10): 65 ~ 70.
- 贺 洋, 徐 韬, 宋 云. 2015. ASD FieldSpec 3 地物光谱数据在水磨-大河地区岩性分类中的应用[J]. *地质力学学报*, 21(1): 21 ~ 29.
- 姜 琴, 何 情, 郑刘根, 等. 2017. 安徽齐云山晚白垩世恐龙蛋矿物和元素组成及古环境分析[J]. *岩矿测试*, 36(4): 340 ~ 349.
- 姜庆虎, 童 芳, 余明珠, 等. 2015. 高光谱技术——生态学领域研究的新方法[J]. *植物科学学报*, 33(5): 633 ~ 640.
- 旷红伟, 许克民, 柳永清, 等. 2013. 胶东诸城晚白垩世恐龙骨骼化石地球化学及埋藏学研究[J]. *地质论评*, 59(6): 1 001 ~ 1 023.
- 刘 波, 方俊永, 刘 学, 等. 2016. 基于成像光谱技术的作物杂草识别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 30(7): 1 830 ~ 1 833.
- 刘凤臣, 于学峰, 贾 超, 等. 2019. 温度场和渗流场耦合对恐龙化石风化破坏的影响[J]. *山东国土资源*, 35(5): 43 ~ 49.
- 沈 强, 张世文, 葛 畅, 等. 2019. 矿业废弃地重构土壤重金属含量高光谱反演[J]. *光谱学与光谱分析*, 39(4): 224 ~ 230.
- 宋香锁, 张尚坤, 贾 超, 等. 2019. 冻融循环对恐龙化石风化破坏机理的研究[J]. *山东国土资源*, 35(5): 62 ~ 65, 72.
- 孙家柄. 2013. *遥感原理与应用* (第3版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 313.
- 童庆禧, 张 兵, 张立福. 2016. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. *遥感学报*, 20(5): 689 ~ 707.
- 王丽琴, 梁国正, 党高潮, 等. 2005. 漫反射光谱技术对文物保护及相关问题的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 25(8): 1 293 ~ 1 296.
- 王珊珊, 周可法. 2016. 岩石矿物表面光谱特征对地质高光谱遥感的影响[A]. 第十五届全国数学地质与地学信息学术研讨会论文集[C].
- 张雷蕾, 李永玉, 彭彦昆, 等. 2012. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. *农业工程学报*, 28(7): 254 ~ 259.
- 张尚坤, 于学峰, 贾 超, 等. 2019. 影响恐龙化石及围岩的主要因素及风化机理研究[J]. *山东国土资源*, 35(3): 25 ~ 31.

附中文参考文献

代晶晶, 王登红, 令天宇. 2019. 基于地面反射波谱技术的锂含量定