

## 利用反射光谱研究砂岩风化与排氮作用 ——以江西龙虎山为例

徐朝斌<sup>1,2</sup>, 邱骏挺<sup>3</sup>, 钟全林<sup>1,2,4\*</sup>, 李宝银<sup>2,4</sup>, 程栋梁<sup>1,2,4</sup>,  
曾汉钊<sup>2</sup>, 常云妮<sup>2</sup>, 余 华<sup>2</sup>, 郑文婷<sup>2</sup>, 邹宇星<sup>2</sup>, 张 川<sup>3</sup>

1. 福建省植物生理生态重点实验室, 福建 福州 350007
2. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007
3. 核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029
4. 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007

**摘 要** 近期,《Nature》、《Science》等世界顶级期刊揭示了地表岩石与全球氮循环的相互作用,认为岩石是氮素的重要储库,其风化排氮是生态系统氮素的主要来源之一,对局部乃至全球氮循环具有重大影响。陆地地表岩石分布面积75%是沉积岩,丹霞地貌是受沉积岩风化侵蚀作用形成的重要地貌类型之一,研究丹霞地貌沉积岩的风化与排氮作用对深入了解全球氮循环过程具有重要意义。以江西龙虎山丹霞地貌出露的红色砂岩为研究对象,在系统的野外样品采集工作基础上,利用偏光显微镜、ASD光谱仪和碳氮分析仪对样品的矿物组成、光谱曲线和氮素含量进行鉴定和测量。结果表明:龙虎山砂岩主要为长石砂岩,颗粒矿物为长石和石英,胶结物以铁质、钙质为主,次为泥质;砂岩的化学风化类型主要有胶结物溶蚀和颗粒矿物水化两种,其中胶结物溶蚀以铁质溶蚀为主,溶蚀后岩石的光谱曲线在902 nm处( $\text{Fe}^{3+}$ 的特征吸收波段)的吸收指数下降,而颗粒矿物水化则主要体现为长石向粘土矿物转变,水化后岩石的光谱曲线在2210 nm处(粘土Al—OH的特征吸收波段)的吸收指数上升。针对同一件样品,已被化学风化的部分与未被风化的部分相比,其氮元素含量有所下降,且氮元素含量与2210 nm处的吸收指数存在一定的负相关关系( $R^2=0.8026$ ),说明岩石风化有助于氮排放;针对不同样品,氮元素含量与2210 nm处的吸收指数相关性很差( $R^2=0.0256$ ),说明岩石矿物组成与结构差异对岩石初始氮含量和吸收指数产生影响,从而降低两者间的相关性。以上研究说明,反射光谱为砂岩风化程度检测与氮排放研究提供了一种重要的技术手段,但研究时必须注意岩性的一致性。

**关键词** 丹霞地貌; 红色砂岩; 风化; 光谱; 氮含量

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3801-08

### 引 言

氮是陆地生态系统必需营养元素之一,对植物生长和发育意义重大<sup>[1]</sup>,与生态环境质量变化<sup>[2]</sup>及碳、硫、磷等元素循环密切相关<sup>[1]</sup>,是近年国内外研究热点。通常认为,森林生态系统的氮主要源自动物残体和植物凋落物<sup>[3]</sup>,其次来自大气氮沉降<sup>[4]</sup>、固氮作用(高能固氮、生物固氮)<sup>[5-6]</sup>和人为

施氮。然而,Houlton<sup>[7]</sup>等与Morford<sup>[8]</sup>等在《Science》、《Nature》等期刊发表的研究成果表明:地表岩石也是重要的氮源之一,每年从近地表岩石释放出约0.19~0.31亿吨氮。

陆地地表分布面积75%是沉积岩,其风化排氮作用不容忽视。我国广泛发育的丹霞地貌,是沉积岩受风化侵蚀作用形成的一种重要地貌类型<sup>[9-10]</sup>,长期受到广泛关注,但相关报道主要集中在地貌成因、景观类型、旅游价值等方面<sup>[9-11]</sup>,对岩石风化和氮元素含量特征的研究却很少。

收稿日期:2019-07-10,修订日期:2019-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41601008,31170596,31370589),福建省基金面上项目(2018J01737),福建省科技厅产学研合作项目(2019N5009),GF预研(3210402),GFKG-HNKF([2017]1403)资助

作者简介:徐朝斌,1987年生,福建师范大学地理科学学院博士研究生 e-mail: xuchaobin2010@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: qlzhong@126.com

地物反射光谱在探究地物类型和成分具有得天独厚的技术优势<sup>[12]</sup>,可实现快速、无损、无接触式检测,在矿物识别、矿物含量估算、岩石类型划分等领域有广泛应用<sup>[13-20]</sup>,在地物与岩石组成分析中也有相关研究<sup>[21]</sup>,但涉及岩石风化研究则较少<sup>[22]</sup>,特别是风化程度与氮元素含量关系研究几乎处于空白。

基于此,本文以江西龙虎山丹霞地貌出露的红色砂岩为研究对象,在系统野外样品采集工作基础上,综合运用岩石矿物显微分析、反射光谱和氮素分析方法,对研究区丹霞砂岩的岩石学、矿物学、光谱、氮元素含量特征进行测定与分析,探究风化作用与岩石氮含量的关系,为深入研究岩石氮排放作用奠定了基础,具有重要的旅游、康体价值,也对全球和区域氮循环具有指示意义。

### 1 研究区概况

#### 1.1 地理概况

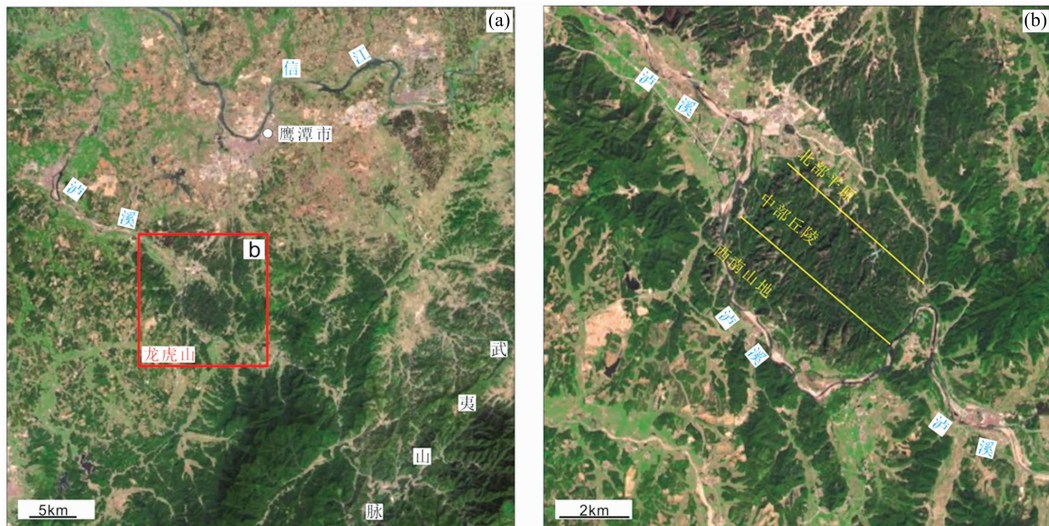


图 1 (a)龙虎山地理位置示意图; (b)龙虎山及周边地区遥感影像图

Fig. 1 (a) Schematic plot of geographical location of Longhushan; (b) Remote sensing image of Longhushan and surrounding areas

(Image courtesy of Google earth)

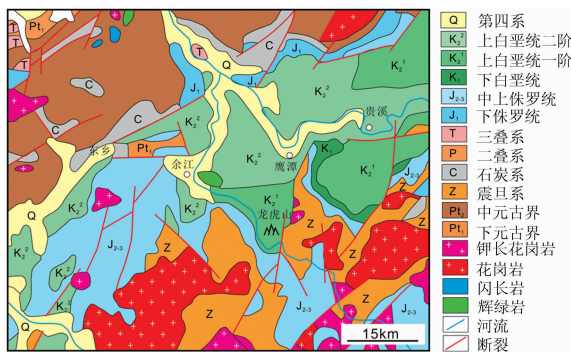


图 2 龙虎山及周边地区地质图(据江西省 1 : 50 万地质图)

Fig. 2 Geological map of Longhushan and surrounding areas (1 : 500 000 geological map of Jiangxi province)

龙虎山位于江西省鹰潭市西南 20 km 处的贵溪市境内(图 1),处于武夷山脉与鄱阳湖平原之间的过渡地带。其地貌形态主要以山地和丘陵为主,地势西南高而东北低。西南部为山地,最高海拔 1 124.8 m,中部为丘陵,海拔介于 240~300 m,东北部为平原,海拔普遍低于 90 m。该地区属中亚热带温暖湿润季风气候,极端最低气温和极端最高气温分别为-9.3 和 41.0 ℃,年平均气温 17.9 ℃,平均降雨量 1 750 mm,平均日照时数 1 749.9 h。境内几乎涵盖亚热带湿润区丹霞地貌的所有种类,其中单体形态包括崖壁、石墙、尖峰、沟谷等,群体形态以侵蚀残余的宽谷型峰丛、峰林与孤峰残丘等为特征。

#### 1.2 地质概况

龙虎山大地构造位于扬子板块与华夏板块拼合带,中生代信江断陷盆地中段南缘。区域地层包含了从下元古界至新生代第四系较为完整的序列(图 2),其中龙虎山地区出露的地层主要为晚白垩世河口组和塘边组。

河口组以紫红色中厚层状复成分砾岩为特征;薄-中厚层状含砾砂岩夹于其中或与之呈不等厚互层;底部与不同地质时代和岩性的地层或侵入岩呈角度不整合或非整合接触;顶部与塘边组整合接触。塘边组以紫红色-砖红色夹灰绿色砂岩、粉砂岩、泥岩为特征,局部夹(含)砾砂岩、石膏、玄武岩;岩石普遍含钙质;产恐龙蛋、介形虫、轮藻等化石;底部与河口组,上部与莲荷组均呈整合接触。区内出露中奥陶世、晚志留世、晚三叠世、晚侏罗世和晚白垩世等不同时代的侵入岩,以复式岩体、杂岩体形式出现,岩性多为花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩等。此外,区内还广泛发育中生代(晚侏罗世-白垩纪)中酸性陆相火山岩,包括流纹斑岩、英安斑岩等。受印支运动的影响,该区域的基底断裂构造普遍继承了东西向展布的特征。在中生代之后,龙虎山转入太平

洋构造域,受古太平洋板块俯冲作用的影响,形成了北东向构造及其伴生的北西向断裂构造。新生代以来,北东向构造,特别是婺源—宁都—安远断裂带,对本区地质地貌的形成与发展有着重要影响。

## 2 实验部分

### 2.1 样品采集

2017年3月在江西龙虎山丹霞景区外围的丘陵地区开

展样品采集工作,主要针对该区新鲜紫红色砂岩及紫红色砂岩中风化褪色的白色砂岩。共设计8个采样地,每一样地内采集2件不同的砂岩样品,共计16件样品(图3)。所有样品分为3份,其中1份送往北京遥望天际科技有限公司进行薄片制片与岩矿鉴定,第2份送往核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室进行光谱测定,第3份送往福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地进行岩石氮含量测定。



图 3 野外采集的砂岩样品照片

Fig. 3 Photographs of sandstone samples taken in the field

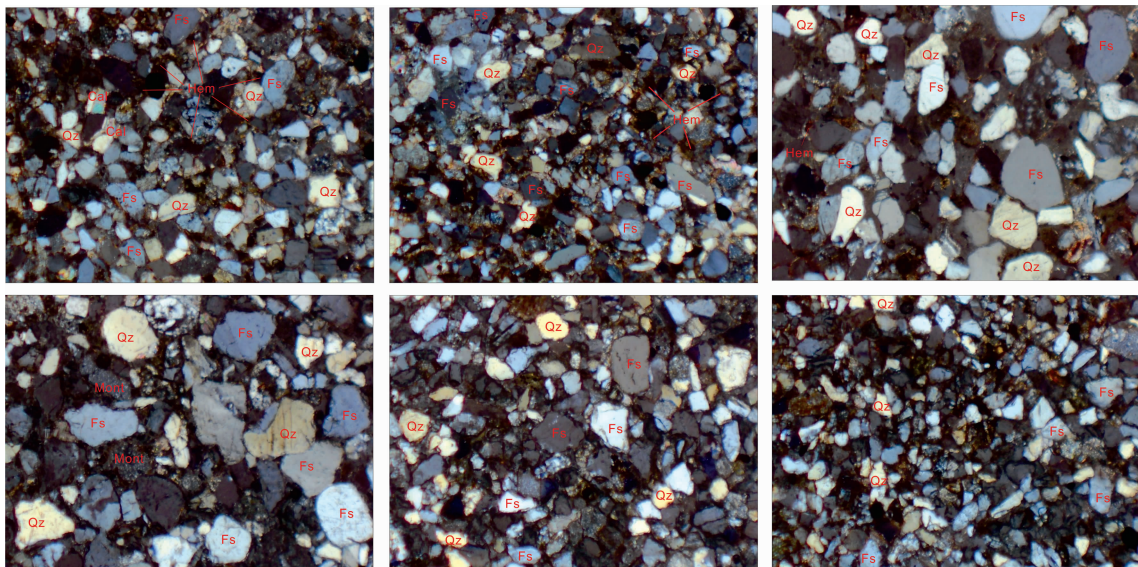
### 2.2 方法

岩石矿物鉴定利用40倍镜的正交偏光完成,岩石光谱测定采用ASD光谱仪测量,岩石氮含量利用碳氮元素分析仪(Vario EL III)测定。

随机选取10件样品进行显微分析(图4),发现砂岩样品主要为细砂-中砂岩,颗粒直径在100~500 μm间,分选性差;颗粒多呈棱角状、次棱角状,有微弱磨圆,部分较大的颗粒磨圆度较好,呈次圆状;颗粒主要成分为石英和长石,石英在偏光显微镜下呈淡黄色、黄白色,表面洁净无糙化,部分颗粒具波状消光,含量约为50%~75%,长石在偏光显微镜下呈淡灰色、灰色、深灰色、灰黑色,部分颗粒表面有糙化或泥化,易转变为蒙脱石,部分颗粒显聚片双晶,含量

## 3 结果与讨论

### 3.1 岩石矿物显微结果



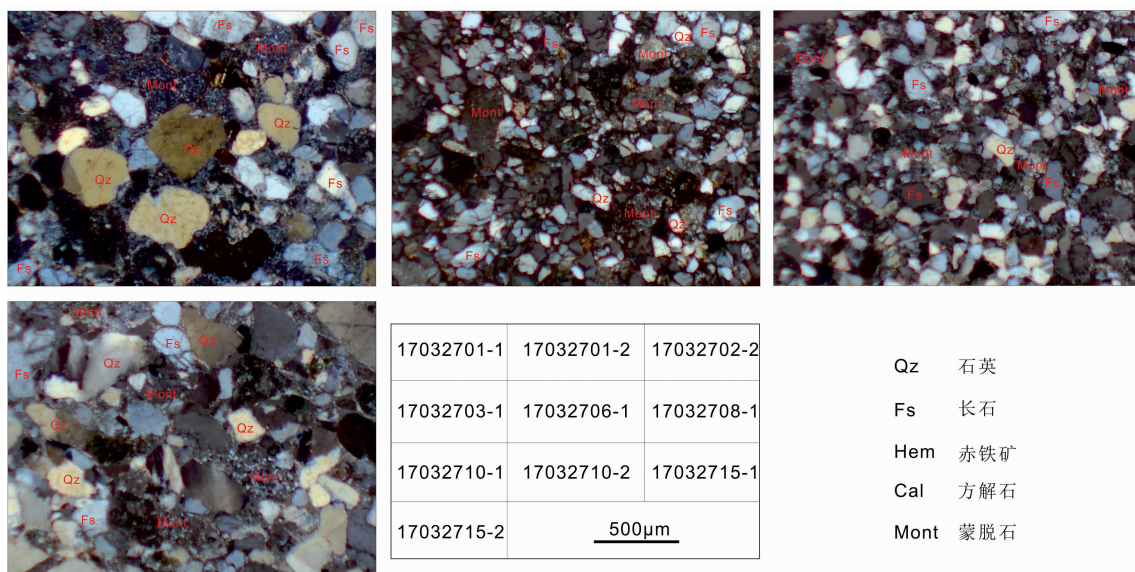


图 4 砂岩样品的偏光显微照片  
Fig. 4 Polarized micrographs of sandstone samples

约为 25%~50%；胶结物类型主要为铁质，次为钙质和泥质，铁质胶结物以赤铁矿或褐铁矿为主，呈枝杈状、脉状分布在颗粒间的空隙中，偏光镜下呈暗红色、褐红色，钙质胶结物以碳酸钙为主，呈小片状充填在颗粒间的空隙中，具有较为明显的节理和高级白干涉色(由于薄片厚度差异易形成多色干涉色)，泥质胶结物以微小的粘土为主，显微镜下呈脉状的微小片状聚集体分布在颗粒之间的空隙中。

3.2 岩石光谱测量结果

对 16 件砂岩样品进行光谱测量发现(图 5)，都具有较为一致的整体特征，即：先快速上升(350~750 nm)，后居于平稳(750~2 100 nm)，最后快速下降(2 100~2 500 nm)。此外，光谱曲线在 400, 1 400, 1 800 和 2 210 nm 附近有十分明显的吸收特征，但在 890, 1 160, 1 780 和 2 345 nm 处则表现出不对称的吸收特征。

3.3 岩石氮素分析结果

考虑到岩石样品的不均一性，将 16 件用于氮素分析的样品又分为 3 部分进行测试。测试结果显示(表 1 和图 6)：除 17032702-1、17032703-2、17032713-2 和 17032715-1 四件

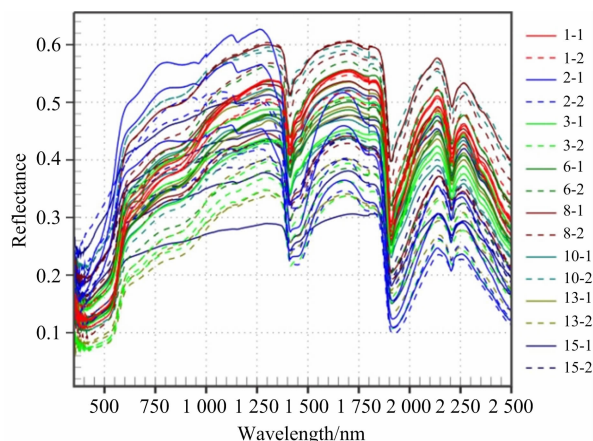


图 5 16 砂岩样品的光谱曲线  
Fig. 5 Spectral curves of 16 sandstone samples

样品外，其余样品分析结果的一致性偏差均不超过 20%。所有样品的氮含量介于 0.10% 至 2.33% 之间，平均值为 0.95%。

表 1 砂岩样品的氮含量分析表  
Table 1 Analysis of nitrogen content in sandstone samples

样号	氮含量/%	样号	氮含量/%	样号	氮含量/%	样号	氮含量/%
17032701-1	0.56	17032703-1	2.26	17032708-1	1.93	17032713-1	0.70
17032701-1	0.69	17032703-1	2.33	17032708-1	1.68	17032713-1	0.64
17032701-1	0.70	17032703-1	2.25	17032708-1	1.71	17032713-1	0.63
平均值	0.65	平均值	2.28	平均值	1.77	平均值	0.66
一致性偏差	14.44	一致性偏差	2.02	一致性偏差	8.65	一致性偏差	6.71
17032701-2	1.42	17032703-2	1.66	17032708-2	0.46	17032713-2	0.10
17032701-2	1.37	17032703-2	0.87	17032708-2	0.55	17032713-2	0.57
17032701-2	1.38	17032703-2	1.80	17032708-2	0.56	17032713-2	0.27
平均值	1.39	平均值	1.44	平均值	0.52	平均值	0.31

续表 1

一致性偏差	1.92	一致性偏差	39.68	一致性偏差	11.99	一致性偏差	82.17
17032702-1	0.79	17032706-1	0.83	17032710-1	0.34	17032715-1	0.69
17032702-1	0.80	17032706-1	1.06	17032710-1	0.38	17032715-1	0.77
17032702-1	0.38	17032706-1	0.82	17032710-1	0.40	17032715-1	0.24
平均值	0.66	平均值	0.90	平均值	0.37	平均值	0.56
一致性偏差	42.13	一致性偏差	17.45	一致性偏差	9.78	一致性偏差	57.95
17032702-2	0.73	17032706-2	2.09	17032710-2	0.55	17032715-2	0.58
17032702-2	0.62	17032706-2	1.98	17032710-2	0.40	17032715-2	0.49
17032702-2	0.75	17032706-2	1.97	17032710-2	0.50	17032715-2	0.49
平均值	0.70	平均值	2.01	平均值	0.49	平均值	0.52
一致性偏差	11.35	一致性偏差	3.87	一致性偏差	17.79	一致性偏差	11.49

注：一致性偏差=最大值[|数值 1-平均值|, |数值 2-平均值|, |数值 3-平均值|]/平均值

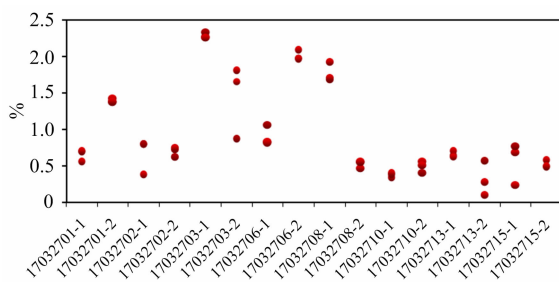


图 6 16 件岩石样品氮含量图

Fig. 6 Nitrogen content in 16 rock samples

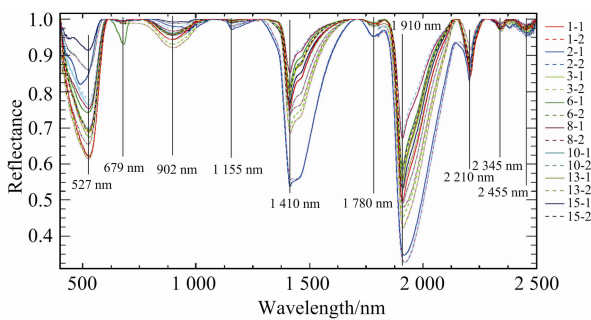


图 7 16 件岩石样品光谱去包络线结果图

每件样品选第 1 条光谱曲线做代表

Fig. 7 Results of spectral envelope removal of 16 rock samples

The first spectral curve is selected as the representative sample

### 3.4 砂岩矿物成分与光谱特征的关系

太阳发射的电磁波与地物相互作用，一部分电磁波发生反射并被传感器以光谱形式接收，光谱形态受地物成分和理化特征控制。前人研究表明，不同矿物光谱特征存在差异，可利用光谱对岩石矿物成分进行指示。

为更好地展示矿物光谱的吸收特征，对 16 件样品的光谱曲线(以每件样品的第一条曲线作为代表)进行去包络线操作(图 7)，发现：16 件样品在 527, 679, 902, 1 155, 1 410, 1 780, 1 910, 2 210, 2 345 和 2 455 nm 处有较明显的吸收特征，其中 902, 2 210 和 2 345 nm 处的特征峰分别与  $\text{Fe}^{3+}$  吸收、 $\text{Al-OH}$  振动、 $\text{CO}_3^{2-}$  振动有关。

光谱吸收指数(spectral absorption index, SAI)通过非吸收基线方程和比值处理剔除非吸收物质的光谱贡献，测渡某一特定波长的相对光谱吸收强度，其计算方法如式(1)所示

$$\text{SAI} = \frac{\frac{W_{s2} - W_m}{W_{s2} - W_{s1}}(R_{s1} - R_{s2}) + R_{s2}}{R_m} \quad (1)$$

其中， $W_{s2}$  和  $W_{s1}$  分别是左右两个肩点的波长位置， $R_{s2}$  和  $R_{s1}$  分别是两个肩点的反射率值， $W_m$  和  $R_m$  则表示待求位置的波长和反射率。该指数不仅可以被用来进行矿物吸收特征的鉴别，还能对矿物丰度进行反演。利用上述方法，计算样品在 902, 2 210 和 2 345 nm 处的吸收指数，得到图 8 所示的吸

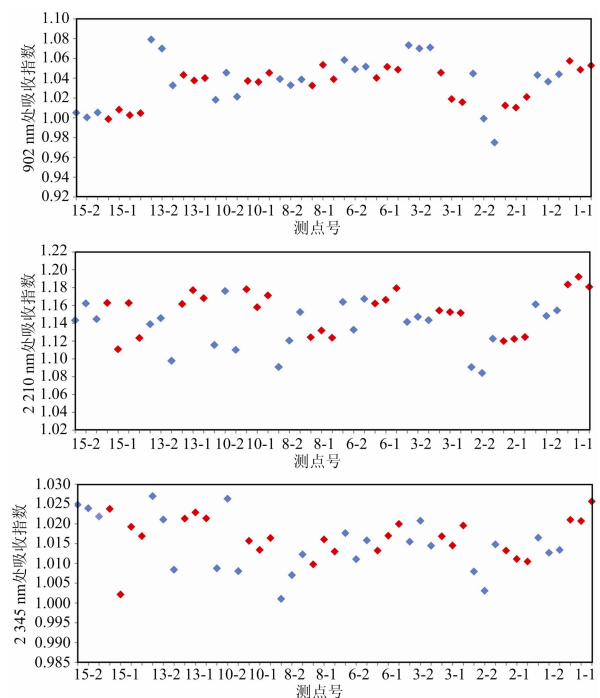


图 8 16 件砂岩样品在 902, 2 210 和 2 345 nm 处的吸收指数情况

(相邻样品以不同颜色显示防止混淆)

Fig. 8 Absorption indices of 16 sandstone samples at 902, 2 210 and 2 345 nm

(Display adjacent samples in different colors to prevent confusion)

收指数图。

从图 8 可知,除少数样品外,绝大多数样品光谱曲线在 902, 2 210 和 2 345 nm 处的吸收指数都大于 1,表明光谱曲线在上述位置呈吸收特征,与图 7 吸收结果基本一致。

另外,17032701-1, 17032703-2 和 17032713-2 等样品在 902 nm 处吸收指数较高,而 17032702-1, 17032702-2, 17032715-1 和 17032715-2 等样品在该处吸收指数较低。结合图 3 研究结果:前 3 件样品呈深红色,后 4 件样品呈白色。由于  $\text{Fe}^{3+}$  含量直接影响砂岩颜色,颜色越红说明  $\text{Fe}^{3+}$  含量越高。因此前 3 件样品具有更高的  $\text{Fe}^{3+}$  含量,其在 902 nm 处的吸收指数也更高。

还发现 17032710-1 比 17032703-1 在 2 210 nm 处有更高的吸收指数。从图 4 发现,2 件样品的结构和矿物含量具有非常相近的特征,但 17032710-1 的长石发生了水化,导致表面形成了蒙脱石,类似现象在 17032703-1 却未发现。在矿物组成相似的情况下,由于 17032710-1 的长石转变为蒙脱石导致 17032710-1 的粘土含量高于 17032703-1,在 2 210 nm 处的吸收指数也高于 17032703-1。

此外,17032701-1 与 17032701-2 相比在 2 345 nm 处具有较高的吸收指数,17032701-1 具有碳酸盐胶结物的晶体(图 4),而 17032701-2 中却难以见到碳酸盐胶结物的晶体,说明 17032701-1 比 17032701-2 的碳酸盐含量更高,因而在 2345 nm 处的吸收指数更大。

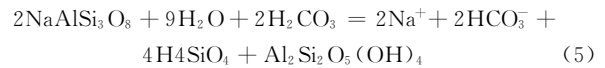
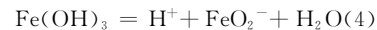
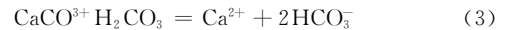
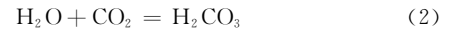
通过对砂岩样品的光谱曲线、光谱吸收指数、照片和显微照片的对比分析可知,样品光谱特征能够很好地反映样品矿物组成与含量特征。

### 3.5 砂岩氮素含量与光谱特征的关系

如前所述,岩石风化作用导致的氮排放对全球氮循环有重要影响。前人主要研究岩浆岩氮元素,认为氮能以铵离子形式置换钾、钙、铷、铯等进入硅酸盐晶格。沉积岩氮素有两种可能的存在形式:(1)赋存在硅酸盐矿物颗粒(如钾长石、辉石、角闪石),是继承母岩矿物中的氮,(2)以有机物形式赋存于矿物颗粒间的空隙,是沉积过程中引入的氮。

Houlton<sup>[7]</sup>等认为,岩石化学风化作用导致矿物晶格的破坏和有机质的排放,从而释放出氮素。砂岩化学风化主要包括溶蚀和水化两种类型,其中溶蚀作用与二氧化碳溶于水后产生的碳酸[式(2)]产生的溶解钙质胶结物[式(3)]或铁质胶结物的电离作用有关[式(4)],水化作用则与碳酸导致长

石转变为粘土矿物有关[式(5)]。



式(3)—式(5)表明,砂岩化学风化导致碳酸钙或铁质胶结物的下降以及长石向粘土转变。根据 3.4 节的分析结果,岩石光谱特征可指示岩石矿物组成及含量。当岩石发生化学风化时,由于矿物含量发生变化,其光谱特征也相应改变。

由于绝大多数砂岩样品颜色较为均一,很难判断样品是否有风化作用。对比发现,17032715-1 和 17032715-2 两件样品同时保存原岩的红色部分以及风化的白色部分,是岩石风化的良好研究对象。这两件样品的红色部分在 902 nm 处的吸收指数分别为 1.004 67 和 1.005 25,而白色部分的吸收指数分别为 0.998 65 和 1.000 27;在 2 210 nm 处,其红色部分的吸收指数分别为 1.123 4 和 1.144 54,白色部分则为 1.162 81 和 1.162 16。对这两件样品全部测点的吸收指数进行相关分析发现,902 nm 处的吸收指数与 2 210 nm 处的吸收指数有较为明显的负相关关系( $R^2=0.787 2$ )(图 9),说明  $\text{Fe}^{3+}$  矿物含量下降而粘土矿物含量上升,风化作用变强。若以 2 210 nm 处的吸收指数与氮素含量进行相关分析可以发现,氮素含量与 2 210 nm 处的吸收指数呈负相关关系( $R^2=0.802 6$ )(图 9),即粘土含量越高,风化作用越强,氮元素含量越低,这与风化作用导致岩石氮排放的观点一致,对全球和区域氮循环具有重要指示意义。

然而值得注意的是,若以全部 16 件样品在 2 210 nm 处的吸收指数同氮含量进行相关分析,得到的相关系数却非常低( $R^2=0.025 6$ )(图 9)。仔细观察样品的显微照片(图 4)可知,不同样品的结构和矿物含量存在差异。由于沉积岩中的氮要么赋存在以长石为主的硅酸盐矿物颗粒中,要么以有机物形式充填于矿物颗粒间的空隙中。岩石的矿物含量和结构差异必然导致初始富集于矿物颗粒或充填于空隙中的氮含量不同。此外,2 210 nm 处的吸收指数虽然反映粘土矿物的含量,不同砂岩由于长石含量不同,即便风化程度一样,粘土矿物的含量也可能不一样,因此,2 210 nm 处的吸收指数并不等同于风化指数,不能简单根据 2 210 nm 处的吸收指数武断评价岩石的风化程度。

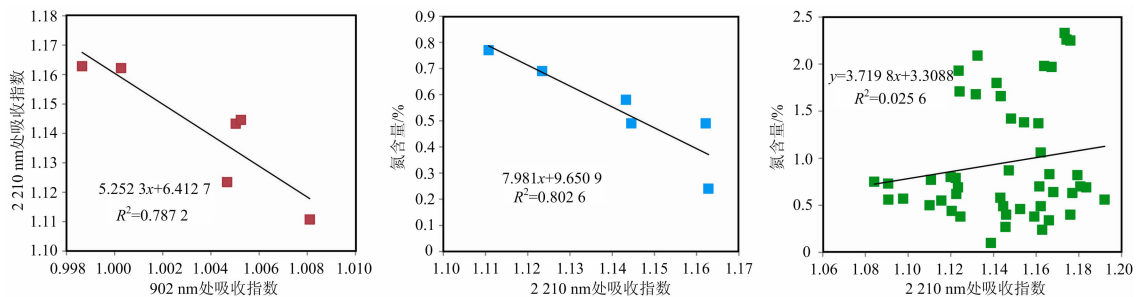


图 9 吸收指数、氮元素含量相关性分析图

Fig. 9 Correlation analysis diagram of absorption index and nitrogen content

由于 17032715-1, 17032715-2 两件样品的风化和未风化部分同属一件样品, 因此不受结构和矿物含量差异的影响。这充分说明, 利用光谱进行岩石样品风化程度检测和氮排放研究时, 必须针对同一件样品(或能确定原岩为同一岩性), 而不能随意选择岩性不同的样品进行研究。江西龙虎山丹霞地貌形态特殊, 其发育过程和风化作用对丹霞地貌景观的保护与合理开发具有重要的指导意见, 本研究对促进生态保护、资源利用、旅游发展都有很好的推动作用<sup>[23]</sup>。

## 4 结 论

龙虎山砂岩的岩性主要为中细粒长石砂岩, 其中石英含

量介于 50%~75%, 长石含量为 25%~50%, 胶结物类型主要为铁质和钙质, 次为泥质。岩石光谱曲线在 527, 679, 902, 1 155, 1 410, 1 780, 1 910, 2 210, 2 345 和 2 455 nm 处有较明显的吸收特征, 其中 902 和 2 345 nm 处的吸收特征分别与铁质和钙质胶结物有关, 2 210 nm 处的吸收特征与长石表面的粘土矿物或泥质胶结物有关。岩石样品氮含量为 0.1%~2.33%, 同一样品风化部分的氮含量较未风化部分氮元素含量低, 氮含量与 2 210 nm 处的吸收指数有较明显相关性( $R^2=0.787\ 2$ ), 但不同样品氮含量与吸收指数的相关性很差( $R^2=0.025\ 6$ ), 可能与不同样品的矿物和结构差异有关。

## References

- [ 1 ] Song X Z, Gu H H, Wang M, et al. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24107.
- [ 2 ] Liu J, Appiah-Sefah G, Apreku T O. *Water Science and Engineering*, 2018, 11(1): 39.
- [ 3 ] Zhang J B, Lv J H, Li Q, et al. *Biogeochemistry*, 2017, 134(1-2): 115.
- [ 4 ] Zhang T A, Chen H Y H, Ruan H. *Ismejournal*, 2018, 12(7): 1817.
- [ 5 ] Sainju U M, Singh H P, Singh B P. *Pedosphere*, 2017, 27(2): 223.
- [ 6 ] Houlton B Z, Wang Y P, Vitousek P M, et al. *Nature*, 2008, 7202(454): 327.
- [ 7 ] Houlton B Z, Morford S L, Dahlgren R A. *Science*, 2018, 360(6384): 58.
- [ 8 ] Morford S L, Houlton B Z, Dahlgren R A. *Nature*, 2011, 477(7362): 78.
- [ 9 ] HUANG Jin(黄 进). *Danxia Mountain Landform(丹霞山地貌)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2010. 17.
- [ 10 ] PENG Hua, PAN Zhi-xin, YAN Luo-bin, et al(彭 华, 潘志新, 闫罗彬, 等). *Acta Geographica Sinica(地理学报)*, 2013, 68(9): 1170.
- [ 11 ] Zhang C, Liu S F, Ye F W, et al. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, 13(1): 14524.
- [ 12 ] CHENG Gong, LI Jia-xuan, WANG Chao-peng, et al(成 功, 李嘉璇, 王朝鹏, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(5): 1571.
- [ 13 ] Yang H M, Qiu J T, Yu L, et al. *Studies in Conservation*, 2019, 64(2): 63.
- [ 14 ] Qiu J T, Qiu L, Mu H X, et al. *Geoheritage*, 2019, 11(3): 1027.
- [ 15 ] Qiu J T, Qi H, Duan J L. *Minerals*, 2017, 7(1): 3.
- [ 16 ] Qiu J T, Zhang C, Hu X. *Remote Sensing*, 2015, 7: 13878.
- [ 17 ] Qiu J T, Li P J, Yu Z F, et al. *Geoheritage*, 2015, 7(4): 307.
- [ 18 ] Xu Q J, Liu S F, Ye F W, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39: 453.
- [ 19 ] Xu Q J, Ye F W, Liu S F, et al. *Remote Sensing*, 2017, 9: 451.
- [ 20 ] Qiu J T, Zhang C, Xu Q J, et al. *Remote Sensing Letters*, 2017, 8: 859.
- [ 21 ] Eisele A, Chabrilat S, Hecker C, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163: 296.
- [ 22 ] LIN Yong-chong, MU Gui-jin, QIN Xiao-guang, et al(林永崇, 穆桂金, 秦小光, 等). *Arid Land Geography(干旱区地理)*, 2018, 41(6): 1278.
- [ 23 ] YU Ming, SUN Fan, LI Jiang-li, et al(余 明, 孙 凡, 李姜丽, 等). *Resources Environment & Engineering(资源环境与工程)*, 2018, 32(3): 499.

## Reflectance Spectroscopy Applied in Sandstone Weathering and Nitrogen Excretion: a Case Study in Longhushan Mountain, Jiangxi Province

XU Chao-bin<sup>1, 2</sup>, QIU Jun-ting<sup>3</sup>, ZHONG Quan-lin<sup>1, 2, 4\*</sup>, LI Bao-yin<sup>2, 4</sup>, CHENG Dong-liang<sup>1, 2, 4</sup>, ZENG Han-zhao<sup>2</sup>, CHANG Yun-ni<sup>2</sup>, YU Hua<sup>2</sup>, ZHENG Wen-ting<sup>2</sup>, ZOU Yu-xing<sup>2</sup>, ZHANG Chuan<sup>3</sup>

1. Fujian Provincial Key Laboratory Eco-physiology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, National Key Laboratory of Science and Technology on Remote Sensing Information and Image Analysis, Beijing 100029, China

4. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

**Abstract** *Nature and Science* have revealed the interaction between surface rocks and the global nitrogen cycle, considering that rock is an important reservoir of nitrogen. Nitrogen excretion during rock weathering is one of the main sources of nitrogen in soil ecosystems, and has a major impact on the local and even global nitrogen cycle. Sedimentary rock, one of the important rock types, occupies 75% of the land surface. Danxia landform is one of the important geomorphologic types formed by the weathering and erosion of sedimentary rocks. Studies on Danxia landform sedimentary rock weathering and nitrogen excretion contribute to better understanding of the global nitrogen cycle. In this paper, we systematically collected red sandstone samples from Danxia landform in Longhushan Mountain of Jiangxi Province, and studied the mineral composition, spectral characteristics and nitrogen content of the rock samples using polarizing microscope, ASD spectrometer and carbon-nitrogen analyzer. The experimental results showed that the sandstones in the Longhushan Mountain area are dominated by feldspar sandstones. The granular minerals include feldspar and quartz, and the cement is mainly composed of iron and calcium with minor muddy. The chemical weathering of sandstone in Longhushan Mountain area includes cement dissolution and hydration. The dissolution of cement is mainly caused by iron dissolution, and the hydration of granular mineral is mainly represented by feldspar altering to clay mineral. The absorption index at 902 nm (the characteristic absorption band of  $\text{Fe}^{3+}$ ) decreased when iron dissolved, while that at 2 210 nm (the characteristic absorption band of clay Al—OH) increased after feldspar altered to clay minerals. For the same sample, the nitrogen content in the chemically weathered part is lower than that in the unweathered part, and the nitrogen content has a negative relationship with the absorption index at 2 210 nm ( $R^2=0.802\ 6$ ), indicating that rock weathering contributes to nitrogen excretion. For different samples, the correlation between nitrogen content and the absorption index at 2 210 nm is very poor ( $R^2=0.025\ 6$ ), indicating that the different mineral compositions and structures of rocks will decrease the correlation between absorption index and nitrogen content. The above studies showed that the reflectance spectroscopy provides a potential approach to study sandstone weathering and nitrogen excretion, but samples used in the study should have same lithology property.

**Keywords** Danxia landform; Sandstone; Weathering; Spectroscopy; Nitrogen content

(Received Jul. 10, 2019; accepted Oct. 30, 2019)

\* Corresponding author