

不同气候带风成沉积中赤铁矿和针铁矿含量对比 ——基于漫反射光谱和色度方法

朱梦园^{1,2}, 吕 镔^{1,2*}, 郭 滢²

1. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福建 福州 350007

2. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007

摘 要 赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)和针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)是风成沉积物和土壤中常见的两种致色矿物, 具有重要的环境指示意义。赤铁矿指示干热环境条件, 针铁矿指示湿冷环境条件。两者同存于沉积物或土壤中, 相互竞争。在实际研究中, 通过应用两者的比例来指示环境条件的变化。由于天然样品中赤铁矿和针铁矿含量低、磁性弱, 传统的X射线衍射方法、化学分析法以及岩石磁学方法都难以准确、便捷地检测出二者的含量。基于两者光学特征, 近年来越来越多的研究者使用漫反射光谱和色度方法尝试进行天然样品中赤铁矿和针铁矿的定量研究。然而, 这两种方法也存在着一些问题。漫反射光谱中赤铁矿和针铁矿特征峰强度受基底效应、晶格离子替代等因素影响; 色度参数的红度同样受晶格离子替代影响, 黄度影响因素更为复杂。因此, 两种方法的相关参数不能简单地等同于赤铁矿或针铁矿含量。两种方法的对比研究显得尤为重要。采用漫反射光谱和色度两种方法分别对于干旱区的新疆博乐、半湿润区的四川金川和湿润区的广东徐闻三个风成沉积剖面进行实验, 分析不同参数对于赤铁矿和针铁矿的指示意义及其适用范围。在此基础上, 探讨针铁矿与赤铁矿比值的环境指示意义。研究结果表明: (1)漫反射方法与色度方法是识别风成沉积物中针铁矿和赤铁矿信号的有效方法, 但由于影响因素复杂, 在大范围空间内仅能作为半定量指标; (2) a^* 能够较好地指示赤铁矿含量, Gt/Hm 与 b^*/a^* 能够较好地反映针铁矿与赤铁矿之间的比值, 但 Gt 与 b^* 不能很好地指示针铁矿的含量; (3)大气水热条件不能完全等同于土体水热条件。大气降水并非完全进入土体, 温度通过蒸发作用影响土壤中水分含量, 土体水热状况受多因素影响。大范围地理空间尺度上, 温度决定化学反应速率, 对于赤铁矿和针铁矿的生成与保存作用大于降水量。

关键词 风成沉积; 针铁矿; 赤铁矿; 漫反射光谱; 色度; 气候带

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)06-1684-07

引 言

赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)和针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)是风成沉积物和土壤中常见的致色矿物, 可以灵敏地指示气候环境条件的变化^[1-3]。赤铁矿和针铁矿含量低、磁性弱, 且受到仪器检测限制等影响, 传统的X射线衍射方法、化学分析法以及岩石磁学方法都难以准确、便捷地检测出二者的含量^[4-5]。目前, 光学方法(漫反射光谱和色度)是检测赤铁矿和针铁矿的重要手段, 具有前处理简单、测量快速、成本低的优势^[1, 6-8]。漫反射光谱方法可提供的参数较多, 如一阶导数曲线上特征峰值、二阶导数曲线上特征峰谷差值^[9]; 经过特定化学方法处

理后的校准方程^[3]。色度CIELAB表色系统中的红度(a^*)和黄度(b^*)分别是红色程度和黄色程度的表征, 受赤铁矿和针铁矿含量的影响。然而这两种方法仍存在一些不足: 如DRS特征峰强度受基质和铝替代含量影响; 色度指标黄度 b^* 随着赤铁矿含量增加而增大, 并不能完全指示针铁矿含量。近期, 我们发现漫反射光谱一阶导数曲线435与575 nm峰高比值(Gt/Hm)和色度参数的黄度与红度比值(b^*/a^*)具有极显著的正相关关系, 更适合指示气候冷干暖湿变化^[9-10]。那么 Gt/Hm 和 b^*/a^* 这两个参数的适用范围如何? 这是值得深入研究的问题。

基于此, 我们选择位于中国西北内陆干旱区的新疆博乐

收稿日期: 2021-04-28, 修订日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877435, 41402149)和福建师范大学创新团队项目(IRTL1705)资助

作者简介: 朱梦园, 1998年生, 福建师范大学地理科学学院硕士研究生 e-mail: zhumengyuan26@163.com

* 通讯作者 e-mail: lvbin@fjnu.edu.cn

黄土、川西高原半湿润区的四川金川黄土-古土壤和沿海平原湿润区的广东徐闻老红砂共三个风成沉积剖面来探讨这一问题。剖面选择的理由如下: (1) 三个剖面在地理空间上跨越半个亚洲、分布于我国地貌三大阶梯上, 代表着不同气候带, 研究区的降水/温度跨度大; (2) 经过风力分选, 风成沉积中原始的矿物以石英、长石等轻矿物为主; 含铁重矿物含量少, 物质组成上相对均一, 极大减小了同一剖面深度上与铁元素/含铁矿物相关参数变化解释的不确定性。

1 实验部分

博乐市位于新疆维吾尔自治区西北部, 为大陆性干旱半荒漠和荒漠气候, 年均气温为 5.6°C , 年均降水量为 181 mm 。剖面地理坐标为 $44^{\circ}55'1.2''\text{ N}$, $82^{\circ}4'48''\text{ E}$, 海拔约为

520 m 。采样剖面沉积物质地均一, 主要呈现出灰黄色, 含有少量钙质结核。按 10 cm 间距进行采样, 获得 66 个样品。

四川省金川县地处青藏高原东部边缘, 为大陆性高原气候, 年均气温为 12.8°C , 年均降水量为 616 mm 。剖面地理坐标为 $31^{\circ}29'47''\text{ N}$, $102^{\circ}4'52''\text{ E}$, 海拔高度约为 2480 m 。剖面出露厚度为 18.2 m , 下伏鹅卵石层。对该剖面 $0\sim 3.5\text{ m}$ 按 10 cm (个别层位按 5 cm) 间距采集 40 个样品, 划分为三层: S0 古土壤层 ($0\sim 1\text{ m}$)、L1 黄土层 ($1\sim 2.3\text{ m}$)、S1 古土壤层 ($2.3\sim 3.4\text{ m}$)。

广东省徐闻县位于中国大陆最南端, 为热带季风气候, 年平均气温 23.3°C , 年平均降水量为 1428 mm 。采样剖面地理坐标为 $20^{\circ}17'47''\text{ N}$, $110^{\circ}01'15''\text{ E}$, 海拔高度为 19.8 m 。剖面为风成老红砂, 按 10 cm 间距连续采样, 共获得样品 25 个。三个剖面位置及照片如图 1 所示。

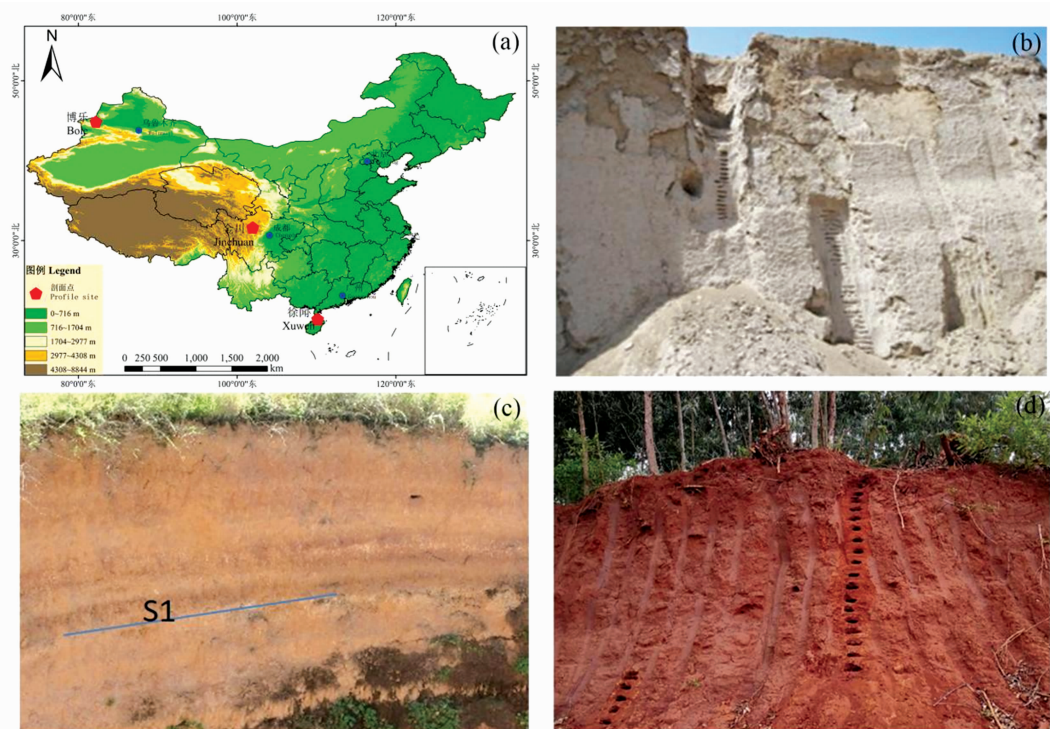


图 1 剖面位置示意图(a)和剖面照片[(b) 新疆博乐剖面; (c) 四川金川剖面; (d) 广东徐闻剖面]

Fig. 1 Schematic diagram of the position of the sections (a) and the photos of sections [(b): Bole; (c): Jinchuan; (d): Xuwen]

漫反射光谱(DRS)测量。样品自然风干后用玛瑙研钵研磨至 200 目以下, 使用岛津 UV-2600+ISR-2600PLUS 紫外/可见光分光光度计测量。测量波长范围设为 $380\sim 720\text{ nm}$, 间距为 5 nm 。对所得结果进行一阶导数处理。为方便叙述, 分别用 Gt 和 Hm 表示一阶导数 435 nm 和 575 nm 波长对应的峰高, 两者比值以 Gt/Hm 表示。这三个参数分别用来估算针铁矿含量、赤铁矿含量及两者比值。

色度参数测量。测试前先将自然风干样品用玛瑙研钵研磨至 200 目以下, 称取约 5 g 样品均匀铺满在测试皿底部, 压平不起皱, 随机选测 3 个表面平整的区域, 采用型号为 CM-700d 的日本柯尼卡美能达色差仪对样品进行测量。测量结果为 CIELAB 色度表达系统。

2 结果与讨论

2.1 DRS 一阶导数曲线特征

图 2 是代表性样品 DRS 一阶导数图, 可明显观察到位于 $575, 510$ 和 435 nm 三个明显的峰, 分别为赤铁矿特征峰、针铁矿主特征峰、针铁矿次特征峰。博乐(BL)剖面[图 2(a)]具有明显的 435 nm 峰, 575 nm 峰与 510 nm 峰叠加; 金川(JC)剖面[图 2(b)] 435 nm 峰和 575 nm 峰明显, 510 nm 峰被赤铁矿掩盖; 徐闻(XW)剖面[图 2(c)] 575 nm 峰非常明显, 而 435 nm 峰不明显, 表明针铁矿含量很低。从图 2 可以推断出干旱区的博乐剖面以针铁矿为主、湿润区的徐闻剖面

以赤铁矿为主、半湿润区的金川剖面既有针铁矿，又有赤铁矿。

2.2 DRS 一阶导数曲线参数随深度变化特征

(1) 单个剖面参数在深度上的变化幅度。JC 剖面 Gt, Hm 和 Gt/Hm 可以很好地对应古土壤层和黄土层，其变化幅度均比 BL, XW 剖面相应参数变化幅度大，符合野外直观的颜色特征。对于 BL 和 XW 剖面 DRS 方法能够反映肉眼无

法识别的差异。(2) 剖面间参数数值比较。对于 Gt [图 3(a)] 和 Gt/Hm [图 3(c)], $XW < JC < BL$; 对于 Hm, $XW > JC > BL$, 情况相反。需要特别注意的是: JC 剖面 L1 层位部分样品的 Gt 值与 BL 剖面相近, L1 层位部分样品的 Hm 值与 XW 剖面相近, 在图 3(a) 和 (b) 上表现为重叠; 而三个剖面的 Gt/Hm 则无这一现象, 三条曲线分离程度高。其可能的原因及指示意义, 将结合色度参数在下文详细讨论。

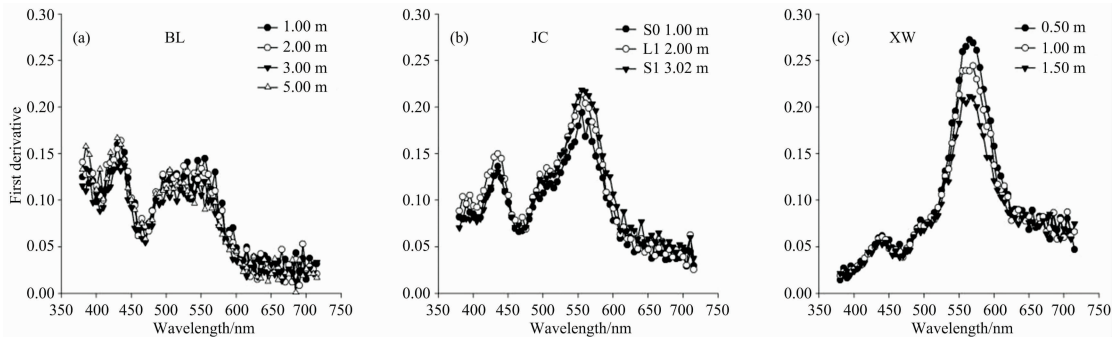


图 2 博乐、金川、徐闻剖面代表性样品 DRS 一阶导数图

Fig. 2 First derivative of DRS: representative samples of Bole, Jinchuan and Xuwen section

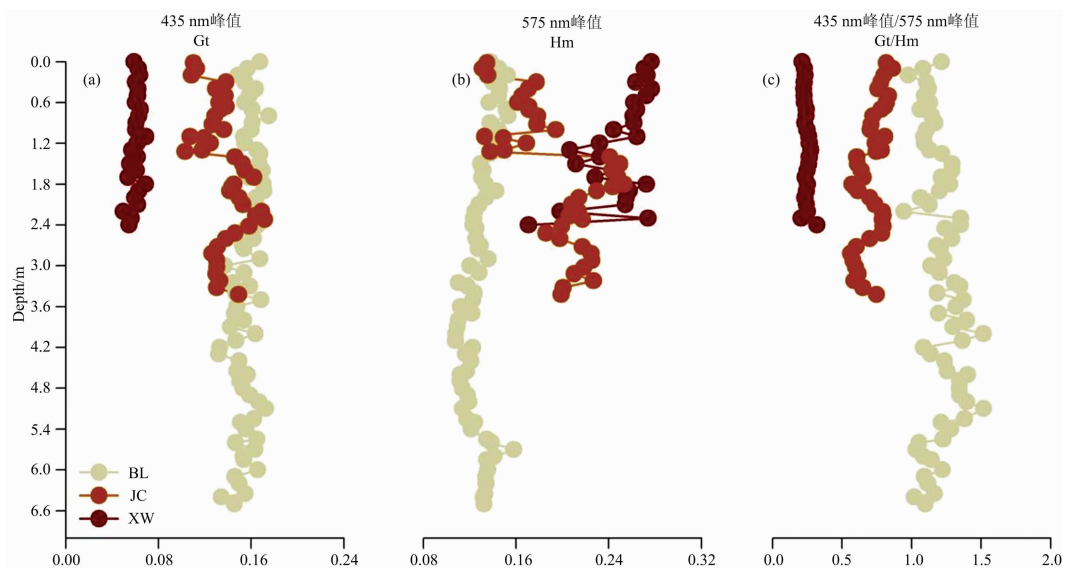


图 3 博乐、金川、徐闻剖面 Gt、Hm 及 Gt/Hm 的 DRS 一阶导数特征峰峰高随深度变化曲线

Fig. 3 The variation curves of Characteristic peak height of DRS first derivative of Gt, Hm and Gt/Hm at Bole, Jinchuan and Xuwen section

2.3 色度参数随深度变化特征

CIELAB 表色系统中, 亮度 L^* 数值在 0(黑)~100(白)之间; 红色 a^* 数值在 60(红)~-60(绿)之间; 黄色 b^* 数值在 60(黄)~-60(蓝)之间。由于 L^* 主要受有机质或碳酸盐含量影响, 本文不做深入讨论。如图 4(a) 所示, BL 剖面 and JC 剖面 L1 层位 1.4~2.3 m 具有最高的 L^* , 这是由于弱发育的黄土层碳酸盐含量高。与 DRS 参数相比, 色度参数具有以下差异: (1) 总体上, 色度参数曲线较为平滑; (2) 三个剖面的色度 b^* 和 a^* 曲线分离程度高; (3) b^* 数值变化为 $BL < JC < XW$, 与 Gt 参数相反。DRS 参数和色度参数最重要的相

似之处在于 Gt/Hm 和 b^*/a^* 具有高度一致的变化规律。

2.4 DRS 参数和色度参数相关关系

整体而言, Hm 与 a^* 、Gt/Hm 与 b^*/a^* 呈现出显著的线性正相关关系, 而 Gt 和 b^* 呈现出负相关关系 [图 5(b)] 或较弱的正相关 [图 5(e), (h)]。从相关系数 R^2 来看, BL 剖面三对散点图数据的 R^2 数值在三个剖面中是最低的。BL 剖面样点为 66 个, 在三个剖面中最高的, 因此 R^2 较低不能归因于样品数量不足。以 Gt/Hm 与 b^*/a^* 的相关图为例, BL 剖面的 Gt/Hm 与 b^*/a^* 数值变化范围在三个剖面中是最大的, 因此数值变化范围也不是 R^2 较低的原因。JC 剖面的 Gt/

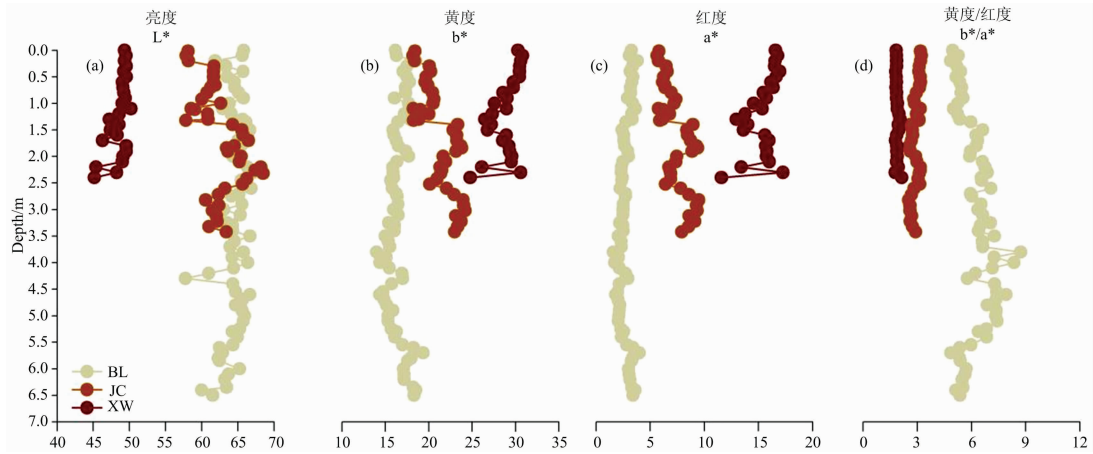


图 4 博乐、金川、徐闻剖面色度参数随深度变化曲线

Fig. 4 The variation curves of chroma of Bole, Xuwen and Jinchuan section with depth

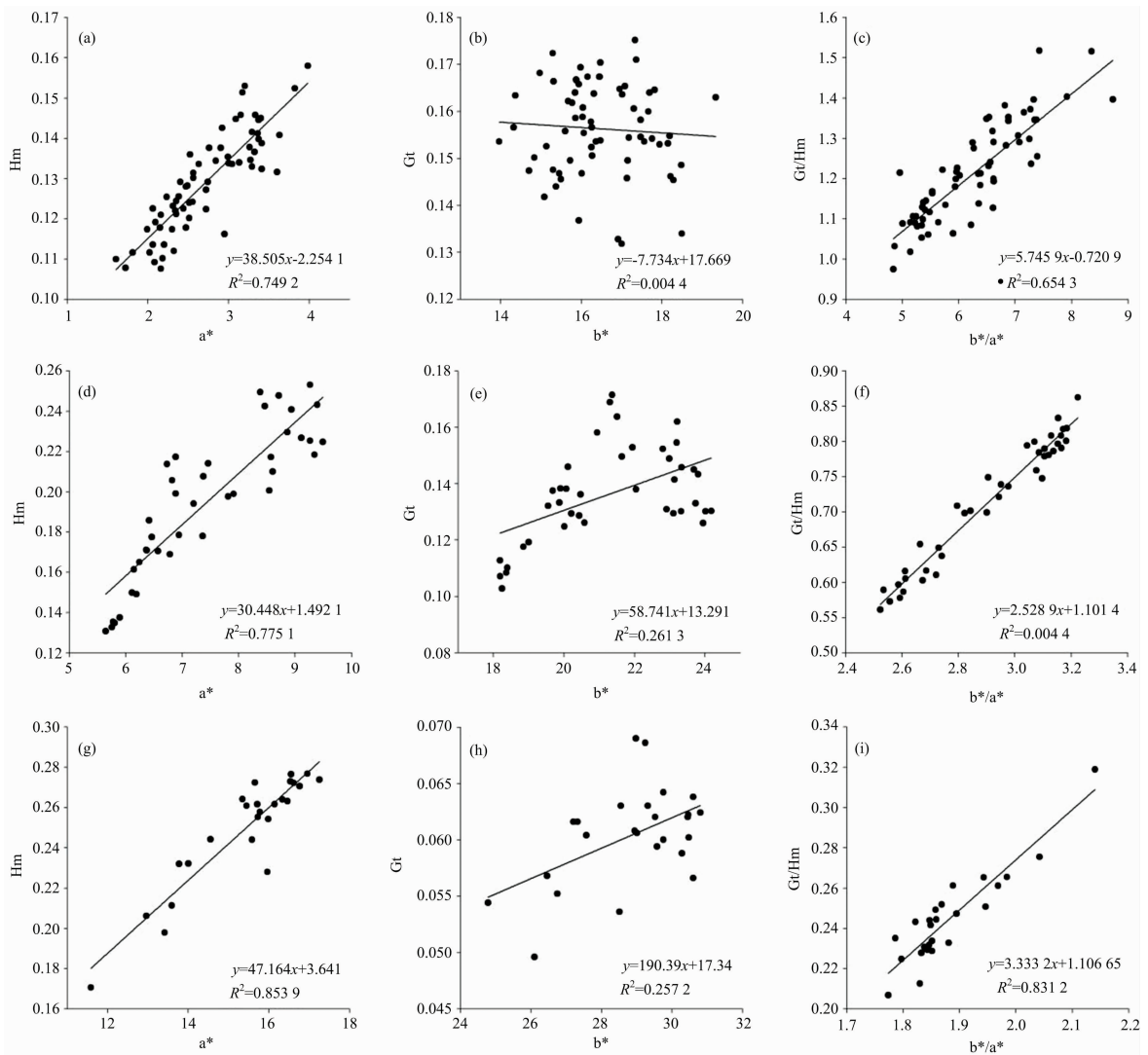


图 5 DRS 参数间与色度参数间散点图

(a)–(c): 博乐剖面; (d)–(f): 金川剖面; (g)–(i): 徐闻剖面

Fig. 5 Scatter plots between DRS parameters and color parameters

(a)–(c): Bole; (d)–(f): Jinchuan; (g)–(i): Xuwen

Hm 与 b^*/a^* 的相关系数最高,可能与古土壤层和黄土层中针/赤铁矿含量差异较大有关。三个剖面的线性拟合方程斜率差异较大,但不具有纬向或经向上的规律性变化。

2.5 DRS 参数 Gt 与 Hm、色度参数 b^* 与 a^* 的相关关系

整体而言,除 BL 剖面的 Gt 与 Hm 外,其他均显示出较为显著的线性正相关关系。三个剖面的 b^* 与 a^* 的相关系数

均达 0.9 以上,显著高于 Gt 与 Hm 的相关系数,这与参数本身性质有关。据人工合成样品的研究,随着样品中赤铁矿百分含量的升高, a^* 和 b^* 均上升^[11]。Gt 与 Hm、 b^* 与 a^* 散点图的线性拟合方程所呈现出的斜率具有规律性变化:从西北到东南,斜率变小。

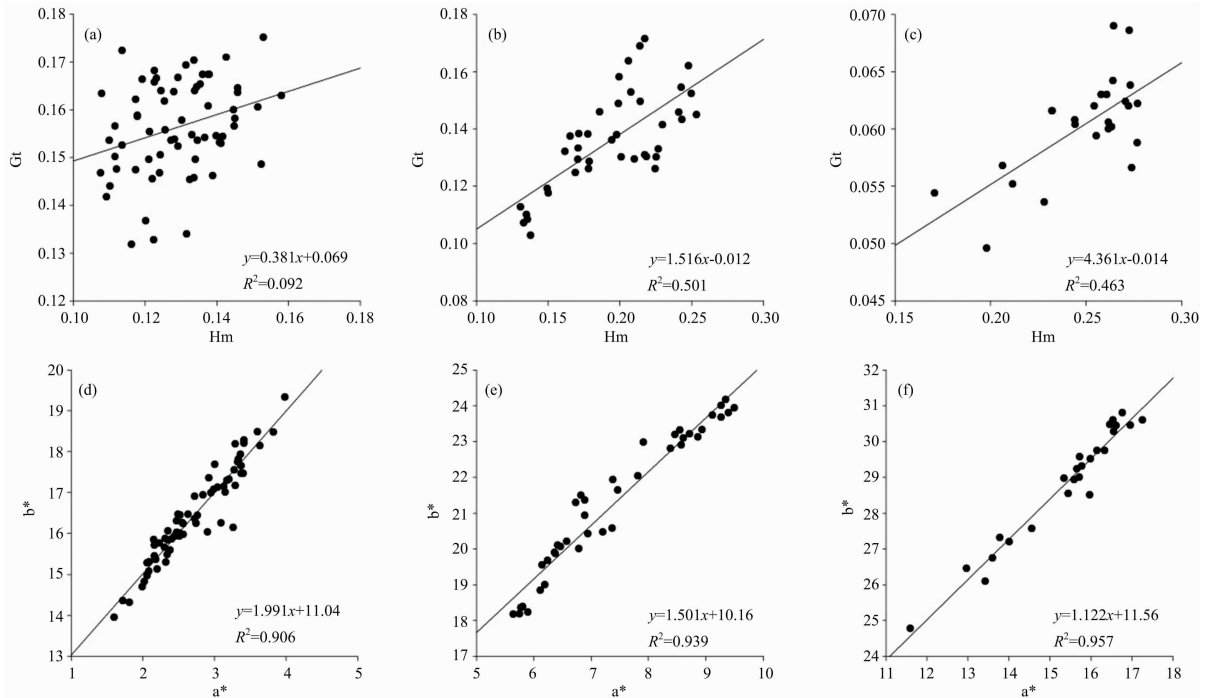


图 6 DRS 参数 Gt 与 Hm、色度参数 b^* 与 a^* 散点图

Fig. 6 Correlation scatter plots of DRS parameters (Gt, Hm) and color parameters (b^* , a^*)

2.6 DRS 参数和色度参数对赤铁矿和针铁矿的指示意义

基于上述实验数据,结合三个风成沉积剖面野外特征、环境条件等,探讨以下三个方面的问题:(1) DRS 参数和色度参数能否比较精确地半定量或定量赤铁矿和针铁矿?(2) 如果可以,哪个/哪些参数更优?(3) 其适用范围如何?

首先,从参数间的相关关系分析。图 5 显示,Hm 和 a^* 、Gt/Hm 和 b^*/a^* 这两组数据分别显著相关,更具指示意义。Gt 和 b^* 不具有一致的规律,其原因是 Gt 受到粘土矿物含量的影响、 b^* 受到赤铁矿含量的影响,这两个参数对针铁矿的指示意义不明确。图 6 显示,不论是哪个剖面,Gt 与 Hm、 b^* 与 a^* 均存在正相关关系,表明赤铁矿和针铁矿含量同步增加。理论上随着风化/成壤作用的增强,母质中含铁硅酸盐中的 Fe^{2+} 释放,在透气环境中被氧化为 Fe^{3+} 。低温条件下,新生成的针铁矿比例更高;高温条件下,新生成的赤铁矿比例更高。即 BL 剖面风化/成壤过程新生成的针铁矿的量高于赤铁矿;而 XW 剖面,赤铁矿的量高于针铁矿;JC 剖面介于两者之间。从西北到东南,Gt 与 Hm、 b^* 与 a^* 的拟合方程斜率均变小,说明新生成赤铁矿的比例升高。Gt, Hm, b^* 和 a^* 参数的实际变化符合理论上的分析。综上,Hm, a^* , Gt/Hm 和 b^*/a^* 这四个参数具有较好的指示意义。

其次,从剖面间变化的角度来分析上述的四个参数。整

体而言, a^* , Gt/Hm 和 b^*/a^* 具有显著的空间规律性,而 Hm 参数在 JC 剖面 and XW 剖面有部分的重叠。XW 剖面风化程度远高于 JC 剖面[图 1(c), (d)],但 XW 剖面的 Hm 没有表现出相应的高值。这是受到基质的影响,暗色基质[低 L^* 值,图 4(a)]使得 Hm 升高受到抑制。 a^* 可以更好地反映赤铁矿含量;Gt/Hm 和 b^*/a^* 可以良好地反映针铁矿和赤铁矿比值。这三个参数在地理空间上变化规律性强(图 2 和图 3),因此其适用范围广,可以用来指示干旱区到湿润区土壤中针、赤铁矿的变化。

2.7 赤铁矿和针铁矿的气候指示意义

BL 剖面、JC 剖面 and XW 剖面的年均温度/年均降水量分别为: $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}/181\text{ mm}$, $12.8\text{ }^{\circ}\text{C}/616\text{ mm}$, $23.3\text{ }^{\circ}\text{C}/1428\text{ mm}$ 。 a^* 平均值分别为: 2.72, 7.42, 15.38(从西北到东南,下同); b^*/a^* 平均值分别为: 6.23, 2.91, 1.88; Gt/Hm 平均值分别为: 1.21, 0.72, 0.25。几组数据的散点图如图 7 所示(拟合方程及 R^2 仅用于衡量三点在同一直线上的程度)。年均降水量和年均气温同步变化,且空间规律性显著[图 7(a)]。 b^*/a^* 平均值和 Gt/Hm 平均值正相关[图 7(b)],所以仅采用 Gt/Hm 平均值与年均气温和年均降水做相关分析。赤铁矿含量随年均气温升高、年均降水量升高而升高[图 7(c), (d)];针铁矿与赤铁矿比值随年均气温升高、年均

降水量升高而下降[图 7(e), (f)]。气温和降水量同步变化,难以判断是气温或降水起主导作用,还是气温和降水共同起作用。从化学式与形成条件的角度分析,赤铁矿和针铁矿是氧化铁和氢氧化铁。理论上,赤铁矿对应干旱环境、而针铁矿对应湿润环境,这与实际观测相左(图 7)。

气温和降水的组合共有四种类型:冷干、冷湿、暖干、暖湿。土壤中的水直接参与了化学反应。气温的作用则有两方面:(1)提供化学反应的能量;(2)通过蒸发调节土体中水分含量。因此,大气水热条件与土体水热条件并不等同。新

疆 BL 剖面远离海洋,降水量少;位于较高纬度地区,气温低。土体存在着季节性湿润状态,一方面是蒸发小,另一方面是冬季地面结冰可保持较深土层的水分含量。BL 剖面在一年中某些时候,土体处于相对冷湿的状态,有利于针铁矿的形成与保存。XW 剖面位于热带、温度高,蒸发量大;且降水中的暴雨(如台风降雨)雨量大,部分雨水通过地面径流进入河湖海而不进入土体。XW 剖面在一年中某些时候,土体处于相对暖干的状态,有利于赤铁矿的形成与保存。大范围地理空间尺度上,温度的作用高于降水量^[12]。

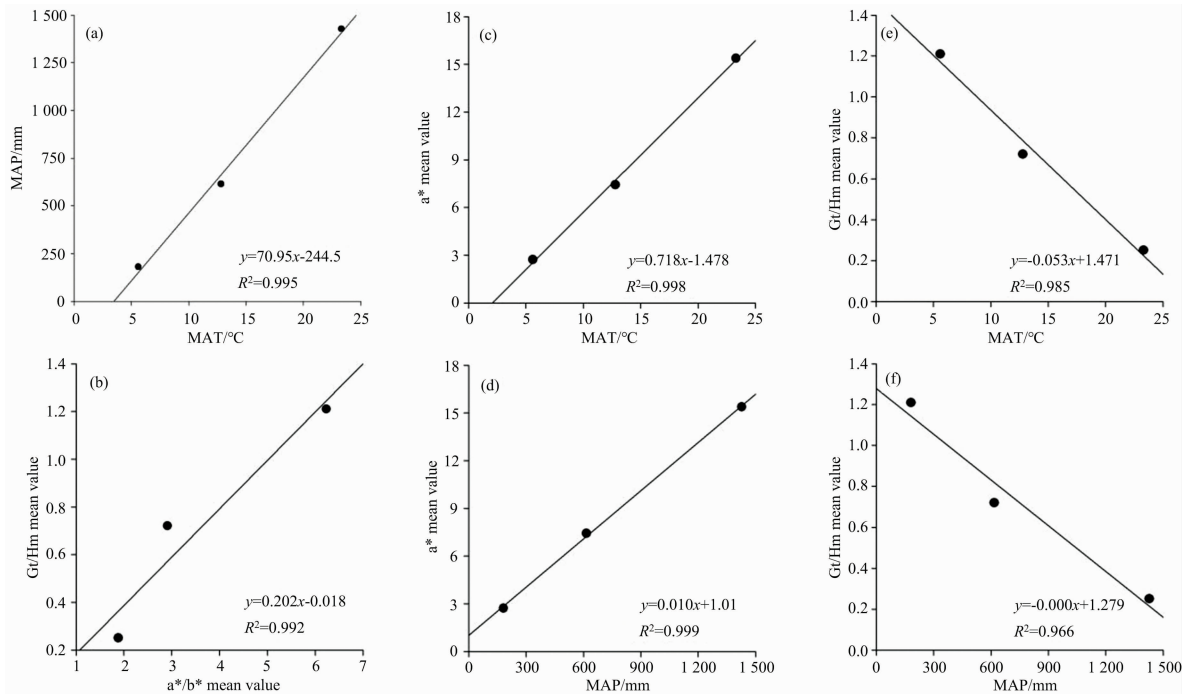


图 7 年均温、年均降水量与色度参数 a^* 均值, DRS 参数 Gt/Hm 均值散点图

Fig. 7 Scatter plots of average annual temperature, average annual precipitation and the mean of a^* and Gt/Hm

3 结论

(1)漫反射方法与色度方法可以高效地识别风成沉积物中针铁矿与赤铁矿的信号,但由于不同参数受不同因素影响,在大范围空间对比上,两者的参数仅能作为半定量指标。

(2) a^* 可以良好地反映赤铁矿含量; Gt/Hm 和 b^*/a^* 可

以良好地反映针铁矿和赤铁矿比值,而 Gt 与 b^* 两者关系复杂,不能很好地指示针铁矿的含量。

(3)大气水热条件不完全等同于土体水热条件。温度通过蒸发量影响土体中的水分含量,湿润地区地表径流量高于干旱地区,多因素共同控制土体水热组合。大范围地理空间尺度上,温度对于赤铁矿和针铁矿的生成与保存的作用高于降水量。

References

- [1] Hu P, Jiang Z, Liu Q, et al. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(6): 4180.
- [2] ZHAO Chen-lei, WANG Zhao-wen, JI Kai-peng, et al(赵晨蕾, 王朝文, 姬凯鹏, 等). Quaternary Sciences(第四纪研究), 2018, 38(1): 54.
- [3] JI Jun-feng, CHEN Jun, Balsam W, et al(季峻峰, 陈 骏, Balsam W, 等). Quaternary Sciences(第四纪研究), 2007, 27(2): 221.
- [4] Huang X, Jiang H, Li Y, et al. Geoderma, 2016, 279: 1.
- [5] Coward E K, Thompson A T, Plante A F. Geoderma, 2017, 306: 206.
- [6] YUAN Xiao-kang, LI Xu-sheng, HAN Zhi-yong, et al(苑晓康, 李徐生, 韩志勇, 等). Geological Journal of China Universities(高校地质学报), 2017, 23(2): 350.

- [7] LIU Yan-guo, LIU Yan-qiu, OUYANG Li-li, et al(刘延国, 刘艳秋, 欧阳莉莉, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(11): 3516.
- [8] Yin K, Hong H, Algeo T J, et al. Scientific Reports, 2018, 8: 3610.
- [9] LIU Xin, LÜ Bin, ZHENG Xing-fen, et al(刘 鑫, 吕 镔, 郑兴芬, 等). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2020.
- [10] LIU Xin, LÜ Bin, LIU Xiu-ming, et al(刘 鑫, 吕 镔, 刘秀铭, 等). Quaternary Sciences(第四纪研究), 2021, 41(1): 63.
- [11] Hu X F, Du Y, Guan C L, et al. Sedimentary Geology, 2014, 303: 15.
- [12] ZHENG Xing-fen, LÜ Bin, CHEN Zi-xuan, et al(郑兴芬, 吕 镔, 陈梓炫, 等). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2020, (5): 1186.

Comparison of Haematite and Goethite Contents in Aeolian Deposits in Different Climate Zones Based on Diffuse Reflectance Spectroscopy and Chromaticity Methods

ZHU Meng-yuan^{1, 2}, LÜ Bin^{1, 2*}, GUO Ying²

1. Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China
2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract Haematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) and goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) are two chromogenic minerals commonly found in aeolian sediments and soils. They are important indicators of environmental change. Haematite indicates dry and hot environmental conditions, while goethite indicates wet and cold environmental conditions. They compete with each other and coexist in sediments and soils. In practical research, the ratio of goethite to haematite is used to indicate changes in environmental conditions. Due to the low content and weak magnetism of haematite and goethite in natural samples, traditional methods, such as X-Ray diffraction, chemical analysis and rock magnetism, have difficulty accurately and conveniently detecting their contents. Based on their optical characteristics, an increasing number of researchers have tried to quantify haematite and goethite in natural samples using diffuse reflectance spectroscopy and chromaticity methods in recent years. There are some differences between these two approaches. The intensity of the characteristic peaks of haematite and goethite in the diffuse reflectance spectrum is affected by the substrate effect, lattice ion substitution and other factors. The redness (a^*) of the chromaticity parameter is also affected by lattice-ion substitution, and the factors affecting the yellowness (b^*) are more complicated. Therefore, the relevant parameters of the two methods cannot be simply equivalent to the content of haematite or goethite. It is particularly important to compare the two approaches. In this study, we use diffuse reflectance spectroscopy and chromaticity to conduct experiments on three aeolian sedimentary profiles: Bole, Xinjiang, in an arid region; Jinchuan, Sichuan, in a subhumid region; and Xuwen, Guangdong, in a humid region; to analyse the indicative significance and applicable range of different parameters for haematite and goethite and to discuss the environmental significances of the ratio of goethite to haematite. The results show that diffuse reflectance spectroscopy and chromaticity methods effectively identify the signals for goethite and haematite in aeolian sediments. However, due to the complex influencing factors, they can only be used as semiquantitative indicators in a large range of space. a^* can better indicate haematite content; Gt/Hm and b^*/a^* can also better reflect the ratio of goethite to haematite; but Gt and b^* cannot indicate well the content of goethite. Atmospheric hydrothermal conditions cannot be completely equal to soil hydrothermal conditions, atmospheric precipitation does not completely enter the soil, temperature affects the moisture content in the soil through evaporation, and the hydrothermal condition of the soil is affected by many factors. Temperature determines the rate of chemical reactions on a large geographic spatial scale, and the effect of temperature on the formation and preservation of haematite and goethite is greater than that of precipitation.

Keywords Aeolian deposit; Goethite; Hematite; Diffuse reflection spectrum; Chroma; Climate zone

(Received Apr. 28, 2021; accepted Jun. 19, 2021)

* Corresponding author