

引起昆明及其周边地区石灰岩高磁化率现象原因初步探讨

林珍如

云南师范大学地理学部，云南 昆明

收稿日期：2025年9月17日；录用日期：2025年10月16日；发布日期：2025年10月27日

摘 要

磁化率一词自第五届土壤学会议提出后便受到广泛关注，以往母岩说中普遍认为高磁化率风化壳应当发育在高磁性玄武岩上，而近年来的研究发现昆明及其周边地区弱磁性石灰岩上却发育目前已知最高磁化率风化壳，通过分别测试该区域玄武岩与石灰岩上覆风化壳Fe元素含量、有机质含量、pH值发现，玄武岩以及石灰岩的Fe含量分别为14%和15%；玄武岩和石灰岩有机质含量分别为1.43%和1.69%；两种岩石的Fe含量与有机质含量总体差异不大，但是玄武岩和石灰岩的pH值分别为5.14和8.16，且基于pH值于实验室模拟合成磁赤铁矿得出pH值为5时产率为13.38%；pH值为8时产率达75.5%，差异显著。由此认为pH是引起昆明及其周边地区玄武岩与石灰岩两种岩石上覆风化壳磁化率差异且引起石灰岩上覆风化壳出现高磁化率现象的重要因素。

关键词

磁化率，玄武岩，石灰岩，pH

A Preliminary Study on the Causes of High Magnetic Susceptibility in Limestones in Kunming and Its Surrounding Areas

Zhenru Lin

Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: September 17, 2025; accepted: October 16, 2025; published: October 27, 2025

Abstract

The term “magnetic susceptibility” has garnered widespread attention since its introduction at the

Fifth Pedology Conference. Previous parent rock theories generally assumed that high-magnetic-susceptibility weathering crusts would develop on highly magnetic basalts. However, recent studies have revealed that the highest-known magnetic-susceptibility weathering crusts develop on weakly magnetic limestones in Kunming and its surrounding areas. Testing of the Fe content, organic matter content, and pH of the weathering crusts overlying basalts and limestones in this region revealed that the Fe content of the basalts and limestones was 14% and 15%, respectively; the organic matter content of the basalts and limestones was 1.43% and 1.69%, respectively; and the Fe and organic matter contents of the two rocks were generally similar. However, the pH values of the basalts and limestones were 5.14 and 8.16, respectively. Laboratory simulations of the synthesis of hematite based on pH values revealed a significant yield of 13.38% at pH 5 and 75.5% at pH 8, indicating significant differences. Therefore, we conclude that pH is a key factor influencing the difference in magnetic susceptibility between the weathering crusts overlying basalt and limestone in Kunming and its surrounding areas, and in causing the high magnetic susceptibility of the weathering crust overlying the limestone.

Keywords

Magnetic Susceptibility, Basalt, Limestone, pH

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自第五次土壤学大会首次提出磁化率一词[1]并引入这一概念到国内,磁化率开始出现在大众视野并被众多学者在不同领域开启了广泛研究。刘东生,安芷生,刘秀铭等人[2]-[6]通过对比记录古土壤与黄土磁化率差异发现古土壤主要形成于温暖湿润的环境下,经受了更强的风化淋溶作用,因此具有高磁化率值,而黄土主要形成于干冷气候下,磁化率值偏低,而由此形成的磁化率旋回可以很好地与深海氧同位素进行匹配,使得磁化率很好成为指示气候变化的重要指标之一。与此同时,在我国南方,由于长期强烈风化作用广泛发育着呈明显红色的土壤,也被称为“红色风化壳”[7],而在该区域磁化率是否也可以作为指示气候变化的指标之一,众多学者也具备不同的观点开启讨论。第一种观点认为在红土区域磁化率也可以很好地作为指示气候变化的指标,赵其国[8]、杨浩[9]等人通过研究安徽宣城剖面发现古红土(古土壤)相较于现代红土具有更高的磁化率值,由此认为在红土区域磁化率也可以成为指示气候变化的指标。另一种观点则认为磁化率并不适用指示气候变化。吕厚远等人[10]认为气候处于温暖湿润时,高风化应当会使得高磁性矿物(磁铁矿/磁赤铁矿)转化为低磁性矿物(赤铁矿)从而应该引起低磁化率现象;黄镇国[11]则认为气候并不影响磁化率的高低,引起磁化率高低是由母岩所决定的,在不同气候带的同一母岩上发育的风化壳磁化率差异不大,而不同母岩即使处于同一气候区域发育的风化壳的磁化率也千差万别。

若是根据以往母岩说理论[12][13],母质是岩石磁性的“本底”,高磁性风化壳通常发育在高磁性母岩上(如玄武岩),但是,有研究却发现云贵高原地区石灰岩上覆发育的风化壳具有目前已知的最高磁化率值,甚至可以超过 $6500 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ [14]。

而为何石灰岩上覆风化壳会出现高磁化率现象目前尚未清楚,但以往研究表明有机质自身的磁性会对磁化率具有一定的贡献,此外,在成土过程中,有机质的存在还有利于磁赤铁矿的形成,并可以阻碍磁赤铁矿等磁性矿物向弱磁性矿物(如:赤铁矿)老化[15]。上世纪70年代Taylor等[16]在实验室合成磁赤铁矿研究中发现Fe含量似乎可以影响磁赤铁矿的含量,他指出当铁含量更多状态下可以生成更多磁赤铁

矿。与此同时, Taylor 也指出当 pH 值为 7 时相较于 pH 值为 6 可以形成更多的磁赤铁矿, 即处于中性甚至偏碱性环境状态相较于酸性环境更有利于磁赤铁矿的形成。而引起该区域石灰岩上覆风化壳高磁化率现象是否是上述因素导致目前尚未清楚, 基于此, 开展一系列实验研究。

2. 材料与方法

2.1. 样品概况

通过前期已有的研究基础, 本文以昆明及周边区域, 分别选取石灰岩上覆风化壳与玄武岩上覆风化壳作为研究对象[17]。

2.2. Fe 含量、有机质含量测定

采用氢氟酸 - 高氯酸 - 硝酸消解法[17]和重铬酸钾法[18]对玄武岩和石灰岩风化壳样品进行前处理并获得 Fe 含量与有机质含量的相应数据。

2.3. pH 测定

称取过 100 目筛的样品 10 g 置于烧杯中, 按照土液比 1:2.5 的比例加入去离子水搅拌使样品与水充分混匀后, 在室温条件下静置 30 min, 待悬液澄清后, 用 pH 计测定上层清液的 pH 值。

2.4. 实验室合成磁赤铁矿

采用共沉淀法合成磁赤铁矿[19]。分别配制氯化亚铁和氯化铁摩尔浓度比为 1:1 的溶液, 氯化亚铁和氯化铁取同等体积数置于烧杯中并放置于磁力搅拌器上, 加入氢氧化钠溶液混合搅拌至指定 pH 数值后停止加入氢氧化钠溶液, 接着继续搅拌混合溶液反应 30 min, 以保证共沉淀反应完全, 后经清洗离心干燥称重并计算产率。

3. 结果

3.1. Fe 含量

对玄武岩与石灰岩上覆风化壳样品的 Fe 含量进行测定分析后发现, 玄武岩风化壳的 Fe 含量为 14%, 石灰岩风化壳的 Fe 含量为 15%, 二者 Fe 含量整体处于相近水平, 未表现出显著差异(图 1)。

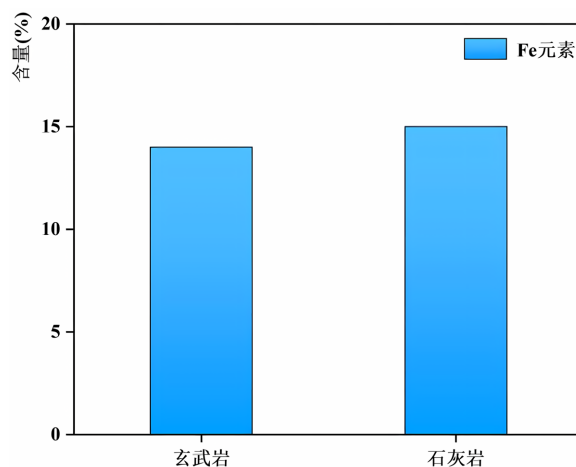


Figure 1. Fe content of basalt and limestone
图 1. 玄武岩、石灰岩 Fe 含量

3.2. 有机质含量

对玄武岩与石灰岩上覆风化壳的有机质含量开展实验测定，结果显示，玄武岩上覆风化壳有机质含量为 1.43%，石灰岩上覆风化壳有机质含量为 1.69%；从整体数据来看，两种岩石风化壳的有机质含量相近，未呈现出明显差异(图 2)。

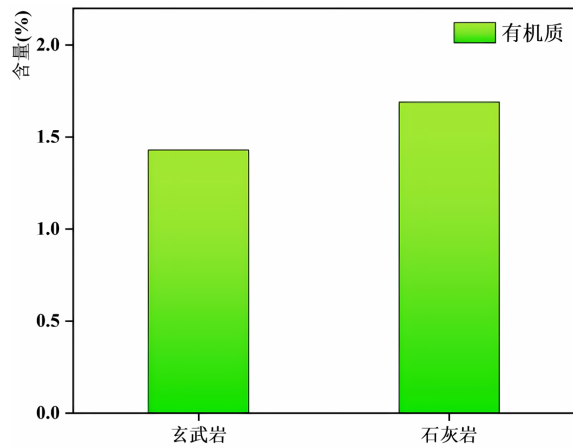


Figure 2. Organic matter content of basalt and limestone
图 2. 玄武岩、石灰岩有机质含量

3.3. pH 及实验室合成磁赤铁矿结果

分别对玄武岩和石灰岩上覆风化壳代表性样品测试 pH 的结果显示，玄武岩 pH 值为 5.14，石灰岩 pH 值为 8.16，而实验室合成磁赤铁矿所采用的 pH 值分别为 5 和 8，近似两种岩石现实形成过程的 pH 环境；进一步根据公式(1)计算出 pH 值为 5 和 8 时实验室合成磁赤铁矿的产率分别为 13.38%和 75.5%，由此可以看出相较于酸性环境，磁赤铁矿更易生成于碱性环境(图 3)。

$$\text{产率}(\%) = \frac{\text{实际质量}(\text{g})}{\text{理论质量}(\text{g})} \times 100\% \tag{1}$$

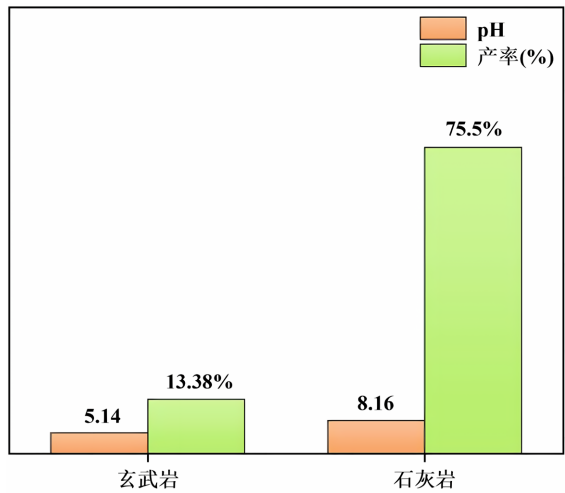


Figure 3. pH of basalt, limestone and laboratory synthesized hematite
图 3. 玄武岩、石灰岩 pH 及实验室合成磁赤铁矿

4. 讨论

磁化率增强机制一直是学术界热议的话题,目前总结起来磁化率的增强机制主要有两个方面:(1) 磁性矿物(主要是磁铁矿、磁赤铁矿)的种类和含量。俞劲炎[20]将风化壳中常见的矿物物质类型可分为铁磁性矿物(如磁铁矿、磁赤铁矿);顺磁性矿物(如蒙脱石、白云石等);反磁性矿物(如高岭石、石英等),而铁磁性矿物中磁铁矿磁化率通常是顺磁性矿物等磁化率值的几千倍,认为磁化率是由铁磁性矿物决定的。韩家懋[21]等在 Maher [22]基础上进一步研究并解释了磁化率增强主要是磁铁矿或磁赤铁矿引起,并与它们的含量有关。卢升高等[23]通过 DCB 处理法对我国东南沿海红风化壳早期研究发现,经 DCB 处理的红风化壳前后磁化率值会发生变化,DCB 法对磁化率具有损失量,而损失的那部分是磁化率值的贡献值,随后更进一步深入研究发现[24],风化壳中各种含铁矿物相互转换,由反铁磁性矿物(赤铁矿、针铁矿)、顺磁性矿物(水铁矿、纤铁矿)向铁磁性矿物(磁铁矿、磁赤铁矿)转换肯定了土壤中磁化率的主要贡献者是铁磁性矿物磁铁矿或磁赤铁矿,而进一步 DCB 法处理研究结果表明,磁赤铁矿相较于磁铁矿存在于游离铁中,可以被溶解,因此风化壳中磁化率更倾向来源于磁赤铁矿的贡献。朱立军[25]早期对云贵高原碳酸盐岩表层风化壳研究也可以进一步证实磁赤铁矿是风化壳的主要磁化率贡献者。(2) 磁性矿物的粒径变化。上个世纪末,学者通过研究发现黄土磁化率主要是由磁性矿物粒径 $\leq 1 \mu\text{m}$ 而决定的[26]。鸟居雅之[27]在黄土磁化率述评中进一步做出解释磁化率与磁性矿物的粒径不是单纯地呈现线性关系,而是在 $1 \mu\text{m}$ 处会呈现一个低峰值,从 $1 \mu\text{m}$ 至 $0.01 \mu\text{m}$,随着粒径变细,磁化率越来越大。而在南方红土区域,磁化率与粒径具有关联也被卢升高[28]、朱丽东等[29]人证实,磁化率主要受到粒径 $<0.02 \mu\text{m}$ 的超顺磁颗粒(SP)铁磁性矿物影响。

但昆明及其周边地区玄武岩和石灰岩上覆风化壳磁性矿物的粒径主要集中在 $1\sim 10 \mu\text{m}$ [17],因此引起昆明及其周边地区石灰岩上覆风化壳磁化率增强机制更加符合第一种,与磁赤铁矿含量有关。而有关磁赤铁矿形成的影响因素,研究表明 pH 会影响 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的转换[30],而 pH 值处于 7.5 与 8.0 环境下更加有利于磁赤铁矿的形成[31],因此相较于 Fe 含量和有机质含量,目前的研究结果更倾向于是 pH 的不同且 pH 为碱性时更易形成较多磁赤铁矿而导致昆明及其周边地区石灰岩上覆风化壳具有高磁化率现象,为后续进一步研究提供了初步探讨。

5. 结论

传统母岩说普遍高磁化率发育于高磁性母岩玄武岩,而昆明及其周边地区石灰岩上覆风化壳相较于玄武岩却具有高磁化率现象,基于该现象对昆明及其周边地区这两种岩石进行 Fe 含量、有机质含量、现实 pH 测试兼实验室不同 pH 合成磁赤铁矿计算产率的对比研究,得出相应结论:

(1) 玄武岩上覆风化壳的 Fe 含量和有机质含量分别为 14%和 1.43%;石灰岩上覆风化壳 Fe 含量和有机质含量分别为 15%和 1.69%,两种岩石上覆风化壳所含 Fe 含量和有机质含量总体差异不大。

(2) 玄武岩上覆风化壳的 pH 值为 5.14,石灰岩上覆风化壳的 pH 值为 8.16;实验室合成磁赤铁矿表明 pH 值为 8 时可以合成 75.5%的磁赤铁矿,而 pH 值为 5 时仅合成 13.38%的磁赤铁矿,因此 pH 为碱性更有利于磁赤铁矿形成并引起高磁化率现象。

参考文献

- [1] Henin, S. and Le Borgne, E. (1955) The Magnetic Properties of Soils and Their Pedo-Logical Interpretations.
- [2] Heller, F. and Tung-sheng, L. (1982) Magnetostratigraphical Dating of Loess Deposits in China. *Nature*, **300**, 431-433. <https://doi.org/10.1038/300431a0>
- [3] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

- [4] 安芷生, 刘东生. 洛川黄土地层学[J]. 第四纪研究, 1989, 9(2): 155-168.
- [5] 刘秀铭, 刘东生, 许同春. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换[J]. 第四纪研究, 1990, 10(1): 42-50.
- [6] 刘秀铭, 刘东生, 许同春. 中国黄土磁颗粒分析及其古气候意义[J]. 中国科学: B 辑, 1991(6): 639-644.
- [7] 卢升高. 中国南方红土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1016-1022.
- [8] 赵其国, 杨浩. 中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究[J]. 第四纪研究, 1995, 15(2): 107-116.
- [9] 杨浩, 夏应菲, 赵其国. 红土系列剖面的磁化率特征与古气候冷暖变换[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 195-200.
- [10] 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学: B 辑, 1994, 24(12): 1290-1297.
- [11] 黄镇国. 中国南方红色风化壳[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [12] 俞劲炎, 詹硕仁. 我国主要土类土壤磁化率的初步研究[J]. 土壤通报, 1981(1): 35-38.
- [13] 卢升高, 俞劲炎. 土壤磁学及其应用研究进展[J]. 土壤学进展, 1991, 19(5): 1-8.
- [14] Lu, S.G., Chen, D.J., Wang, S.Y. and Liu, Y.D. (2012) Rock Magnetism Investigation of Highly Magnetic Soil Developed on Calcareous Rock in Yun-Gui Plateau, China: Evidence for Pedogenic Magnetic Minerals. *Journal of Applied Geophysics*, 77, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.11.008>
- [15] 邓少福, 杨太保, 秦宏毅, 等. 新疆塔城黄土古土壤磁化率特征及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 848-854.
- [16] Taylor, R.M. and Schwertmann, U. (1974) Maghemite in Soils and Its Origin: II. Maghemite Syntheses at Ambient Temperature and pH 7. *Clay Minerals*, 10, 299-310. <https://doi.org/10.1180/claymin.1974.010.4.08>
- [17] 叶玉林. 滇东高原高磁化率风化壳载磁矿物特征与化学风化程度研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2019.
- [18] 陈胜. 云贵高原西部山原红壤 A 层色度特征及致色物质研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- [19] Babay, S., Mhiri, T. and Toumi, M. (2015) Synthesis, Structural and Spectroscopic Characterizations of Maghemite γ -Fe₂O₃ Prepared by One-Step Coprecipitation Route. *Journal of Molecular Structure*, 1085, 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.12.067>
- [20] 俞劲炎. 土壤磁学——土壤学研究的新领域[J]. 土壤学进展, 1979(4): 1-12.
- [21] 韩家懋, Hus, J.J., 刘东生. 马兰黄土和离石黄土的磁学性质[J]. 第四纪研究, 1991(4): 310-325.
- [22] Maher, B.A. and Thompson, R. (1991) Mineral Magnetic Record of the Chinese Loess and Paleosols. *Geology*, 19, 3-6. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0003:mmrotc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0003:mmrotc>2.3.co;2)
- [23] 卢升高, 董瑞斌, 俞劲炎, 等. 中国东部红土的磁性及其环境意义[J]. 地球物理学报, 1999, 42(6): 764-771.
- [24] 卢升高. 亚热带富铁土的磁学性质及其磁性矿物学[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 498-504.
- [25] 朱立军, 傅平秋. 碳酸盐岩发育土壤中的磁赤铁矿及其成因机理研究[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 1997, 26(2): 27-30.
- [26] 雷祥义, 岳乐平, 王建琪, 等. 秦岭凤州黄土磁学特征及其古气候意义[J]. 科学通报, 1998, 43(14): 1537-1540.
- [27] 鸟居雅之, 福间浩司, 苏黎, 等. 黄土-古土壤磁化率述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 83-96.
- [28] 卢升高. 土壤频率磁化率与矿物粒度的关系及其环境意义[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 9-15.
- [29] 朱丽东, 姜永见, 张明强, 等. 庐山 JL 剖面红土磁化率特征及古环境记录[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 385-394.
- [30] Colombo, C., Palumbo, G., He, J., Pinton, R. and Cesco, S. (2014) Review on Iron Availability in Soil: Interaction of Fe Minerals, Plants, and Microbes. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 538-548. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0814-z>
- [31] 谢晶, 舒歌平, 李克健, 等. pH 值对铁系催化剂结构的影响[J]. 煤炭转化, 2014, 37(4): 69-73.