

碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展

芮建雄

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年1月22日; 录用日期: 2026年2月7日; 发布日期: 2026年2月24日

摘要

红土是热带、亚热带岩溶地区广泛分布于碳酸盐岩上的特殊性土类。长期以来, 红土成因存在较大争议, 分歧在于红土的物质主体究竟是下伏基岩的原地风化残积物, 还是外源输入的沉积物。本文系统梳理全球碳酸盐岩上覆红土研究的核心进展, 明确中国西南喀斯特地区以原地风化残积学说为主导、地中海沿岸地区以外源搬运沉积学说为核心的区域分异特征, 深入总结了不溶残渣贡献能力、物质来源多元性、红土化作用演化等核心争议与热点问题, 剖析了气候、地质等要素对红土成因的耦合驱动机制, 并展望未来研究方向, 为该领域的深入研究提供参考。

关键词

碳酸盐岩, 红土, 形成机制, 原地风化, 外来沉积

Research Progress on the Formation Mechanism of Terra Rossa Overlying Carbonate Rocks

Jianxiong Rui

Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: January 22, 2026; accepted: February 7, 2026; published: February 24, 2026

Abstract

Terra rossa is a special soil type widely distributed over carbonate rocks in tropical and subtropical karst regions. The genesis of terra rossa has long been subject to considerable controversy, with the core dispute centering on whether the main material composition of this soil is derived from autochthonous residual sediments generated by the *in-situ* weathering of underlying bedrock or from allochthonous transported sediments input from external sources. This paper systematically reviews

the core research progress on terra rossa overlying carbonate rocks worldwide, clarifies the regional differentiation characteristics that the autochthonous weathering-residual theory dominates in the karst areas of Southwest China while the allochthonous transport-deposition theory prevails in the coastal regions of the Mediterranean. It further summarizes the key controversies and research hotspots, including the contribution capacity of insoluble residues, the material source diversity, and the evolution of ferrallitization. Moreover, this paper analyzes the coupled driving mechanism of climate, geology and other factors on terra rossa genesis, and prospects future research directions, so as to provide a reference for in-depth studies in this field.

Keywords

Carbonate Rocks, Terra Rossa, Formation Mechanism, *In-Situ* Weathering, Allochthonous Sedimentation

Copyright © 2026 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

碳酸盐岩是由方解石、白云石等自生碳酸盐矿物组成的沉积岩，组成以方解石为主的岩石称为石灰岩，以白云石为主的岩石称为白云岩[1]。全球碳酸盐岩覆盖面积有 2200 万 km²，主要分布在欧洲的地中海沿岸、美国东部岩溶区以及中国西南部喀斯特地区[2]。红土是热带、亚热带岩溶地区广泛分布于碳酸盐岩上的特殊性土类，常以不连续层的形式覆盖在碳酸盐岩上，厚度从几厘米到几米不等[3]。红土主要由黏粒矿物(蒙脱石、高岭石、三水铝石等)、铁氧(氢)化物(赤铁矿、针铁矿等)和碎屑矿物(石英等)组成[4]。长期以来，关于碳酸盐岩上覆红土成因存在较大争议，分歧在于碳酸盐岩上覆红土的物质主体究竟是下伏基岩的原地风化残积物[5]，还是外源输入的沉积物[6]。本文系统梳理全球碳酸盐岩上覆红土研究的核心进展，总结当前研究热点与分歧，展望未来研究方向，为该领域的深入研究提供参考。

2. 红土形成机制研究进展

目前，随着同位素地球化学、矿物学等分析技术的不断发展，国内外关于碳酸盐岩上覆红土的研究主要形成了两种观点，即红土原地风化残积学说[7]-[11]和外来搬运沉积学说[12]-[16]。红土原地风化残积学说主要集中在在中国西南部喀斯特地区[17]，外来搬运沉积学说则主要集中在地中海及沿岸地区[18]。

2.1. 原地风化残积学说

原地风化残积说认为红土是下伏碳酸盐岩在长期表生风化作用下，经脱钙、铁铝富集等地球化学过程形成的残积产物[19]。碳酸盐岩的主要成分碳酸钙(镁)在雨水、地下水的溶蚀作用下大量淋失，而岩石中的硅、铝、铁等不溶组分则残留原地，经长期积累与成土作用逐渐形成红色黏土堆积[20]。

在中国西南部喀斯特地区，众多学者通过野外剖面调查、矿物学分析、元素地球化学及同位素示踪等多元手段开展了系统研究并积累了丰富证据，初步明确了红土的原地残积特征。

野外剖面调查发现，红土下部保留与下伏基岩一致的层理结构，且红土与下伏碳酸盐岩多呈平行不整合的锯齿状或溶洞状接触，无异地搬运的平整接触特征，红土中堆积型铝土矿呈角砾状且无磨圆特征，空间上与母岩高度契合，同时剖面中未发现火山玻璃等火山灰特征矿物，排除了火山灰等外源物质的贡献可能[10][21]。矿物学分析研究表明，基岩碳酸盐岩酸不溶物的矿物组成与上覆红土基本一致，白云岩

不溶残渣以伊利石为主, 红土黏土矿物则呈现伊利石向高岭石、三水铝石转化的演化序列, 基岩原生黄铁矿在风化壳中转变为次生赤铁矿和针铁矿, 红土中还发现与基岩风化相关的次生稀土矿物, 这些均符合原地风化的矿物演化规律[10][22]。元素地球化学特征进一步佐证了原地成因, 从基岩到红土的稀土配分模式相似, 关键比值呈现明显继承关系, Nb-TiO₂、Zr-TiO₂等微量元素相关图中样品点表现出良好线性关系, TiO₂/Al₂O₃、Fe₂O₃/Al₂O₃等不活动元素对的比值在基岩和红土中波动极小, Ca/Al、Mg/Al等活动元素比值呈规律性递减, 化学风化指数(CIA)集中在强风化范围且从红土-基岩界面到剖面顶部无显著变化, A-CN-K三角图中样品集中在A-K连线附近并趋向A端, 与风成黄土、火山岩等异地沉积物的地球化学特征差异显著[10][22]-[24]。季宏兵等通过REE演化特征分析, 提出白云岩风化的两阶段模型, 完善了原地风化的理论体系。同位素示踪技术更精准地证实了物质来源的单一性与原地演化特征, 红土的 $\delta^{30}\text{Si}$ 、 $\delta^7\text{Li}$ 值变化范围狭窄且无异常突变, 与下伏基岩不溶残渣同位素特征呈连续演化, 且与风成黄土、火山岩等异地参考端元完全不重叠, $\delta^7\text{Li}$ 与 $\delta^{30}\text{Si}$ 呈线性负相关的耦合分馏特征, 契合原地风化的物理化学过程[24]; 而红土与下伏白云岩的 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值呈连续过渡且无异常断代, 随风化程度加深呈现规律性变化, 进一步排除了外源物质介入[25]。

上述多维度证据共同证实, 中国西南喀斯特地区碳酸盐岩上覆红土是下伏基岩经原地风化作用形成的产物, 无显著外源物质混入, 提出的两阶段风化模型, 为深入理解喀斯特地区风化过程与环境演化提供了重要基础。

2.2. 外来搬运沉积学说

外来沉积说, 强调碳酸盐岩的不溶残渣含量极低, 仅依靠原地残积作用难以形成厚度较大的红土堆积, 其物质主体应来自外源输入[6]。在外力搬运的具体方式上, 学界又存在风成搬运与水成搬运两种细分观点。风成成因观点认为, 红土的物质可能源自区域外的沙漠、戈壁等物源区, 经大气环流搬运至碳酸盐岩分布区后沉积[26]; 水成成因观点则认为, 周边非碳酸盐岩山区的风化产物经地表径流搬运至喀斯特区域, 在适宜的地貌部位沉积并经成土作用改造形成红土, 该观点可解释部分沿河谷、洼地分布的红土厚度大、物质成分复杂的特征[27]。

在地中海沿岸地区的碳酸盐岩上覆红土成因研究则呈现出外源粉尘输入主导的结论, 揭示了红土成因的区域差异性。

Muhs等对西班牙马略卡岛红土开展中子活化分析(INAA), 发现碳酸盐岩与红土的Zr/Hf、La/Yb、Cr/Sc和Th/Ta等非活动性元素比值存在显著差异, 而红土的相关比值与非洲粉尘高度吻合且处于其数值区间内, 证实该区域红土物质来源为远源非洲粉尘, 而非碳酸盐岩原地残积[26]。Sandler等针对地中海沿岸地区红土的粒度分布、黏土矿物及化学组成研究表明, 红土黏土的粗模态粒度与区域粉尘特征一致, 且存在远程粉尘典型的细模态粒度, 黏土粒级的主量与微量元素组成也与粉尘高度匹配, 红土黏土矿物组合是以粉尘初始矿物为底物经成土作用改造而成, 与碳酸盐岩不溶物的矿物组成存在本质区别, 进一步佐证粉尘为红土主要母质[28]。Amit等对比环地中海区域红土颗粒特征, 发现克里特岛、加利利地区红土的粒度分布单峰模态与撒哈拉远距离传输细粉尘的模态完全一致, 明确了撒哈拉沙漠是地中海红土的核心粉尘源区[29]。Durn等对克罗地亚伊斯特拉半岛红土的稀土元素比值分析与土壤薄片观察显示, 红土La/Ce、Sm/Nd比值与阿尔卑斯碰撞造山带及波河盆地粉尘特征吻合, 且剖面中存在无法由本地碳酸盐岩风化形成的铝土矿碎屑、石英颗粒等异地物质残留体, 证实碳酸盐岩仅为红土形成提供适宜的环境条件, 而非物质来源[30]。Razum等通过重矿物组合与成分分选效应分析, 发现北亚得里亚海地区红土的绿帘石/斜黝帘石、蓝晶石/十字石等重矿物比值与亚得里亚海大陆架风成黄土高度重合, 红土锆石的形态、粒径特征及电气石-锆石的密度分选规律, 均符合风成搬运过程的物质分选特征, 且红土粉砂/黏土

比与大陆架黄土高度匹配,与碳酸盐岩不溶残渣差异显著,证实该区域红土硅质碎屑源于阿尔卑斯-亚平宁物源的风力搬运[31]。

基于上述众多学者的研究,明确地中海地区碳酸盐岩上覆红土是以远源粉尘为核心母质经成土作用改造形成的产物,而非下伏碳酸盐岩原地残积的结果,明确的粉尘源区与物质搬运过程,为深入理解陆缘风尘沉积与红土化作用的耦合机制提供了重要依据。

3. 讨论

3.1. 红土成因区域分异的核心驱动因素

碳酸盐岩上覆红土成因的显著区域分异特征:中国西南喀斯特地区以原地风化残积为主导,地中海沿岸地区则以外源粉尘搬运沉积为核心。这种分异并非单一因素作用的结果,而是气候条件、地质背景及物源供给等多要素耦合作用的必然产物,深入解析各驱动因素的作用机制,是理解红土成因复杂性的关键。

气候条件是红土形成的基础驱动力,其差异直接决定了风化作用类型与强度,以及物质搬运的主导方式。中国西南喀斯特地区地处亚热带季风气候区,年均降水量可达 800~1500 mm,且雨热同期,这种气候特征为碳酸盐岩的化学风化提供了优越条件[32]。碳酸盐岩溶蚀反应($\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)速率与温度正相关,间冰期升温使其提速 2~3 倍,加速可溶性组分(Ca^{2+} , HCO_3^-)淋失,为不溶残渣富集创造条件[33]。相比之下,地中海沿岸地区受地中海气候控制,呈现夏季炎热干燥、冬季温和多雨的特征,这种气候分异对红土形成的影响体现在两个方面:一方面,夏季干燥少雨的环境限制了本地碳酸盐岩的化学风化强度,使得原地不溶残渣的产出量极低,难以满足厚层红土堆积的物质需求;另一方面,冬季盛行的西风环流成为外源物质搬运的核心动力[34]。地质历史时期,撒哈拉沙漠的细颗粒粉尘在西风作用下跨越地中海,持续沉降至沿岸碳酸盐岩分布区,而阿尔卑斯-亚平宁造山带的风化产物也可通过风力或间歇性水搬运至该区域[31]。这些外源物质在适宜的地貌部位沉积后,借助冬季有限的降水进行初步成土作用,逐步改造为红土。

综上,红土形成的耦合驱动机制的核心是“气候波动-关键过程(化学风化/风尘输入)-红土化”的协同联动:中国西南喀斯特地区的耦合核心是“温度-降水”对化学风化速率的直接调控,间冰期高温高湿驱动高效风化与红土化。地中海沿岸地区的耦合核心是“温度-降水-西风环流-沙漠范围”的链式反应,通过调控风尘输入通量与后期风化强度,形成“冰期堆积、间冰期改造”的红土化模式。两者的差异本质上是不同气候背景下,温度、降水对“内源风化”与“外源输入”两种红土物质来源路径的差异化调控结果。

地质背景与物源供给能力是红土成因区域分异的核心物质基础。中国西南喀斯特地区广泛分布的碳酸盐岩虽以可溶性组分为主,但长期的表生风化过程中,其不溶残渣的持续积累形成了稳定的物质供给。研究表明,该区域白云岩的酸不溶物含量虽仅为 1%~5%,但在数百万年的长期风化作用下,结合喀斯特地貌的封闭性(如洼地、谷地),不溶残渣可逐步堆积形成数米厚的红土[10]。同时,该区域地壳相对稳定,无大规模的构造运动导致风化产物的异地搬运,进一步保障了原地残积过程的持续进行。此外,区域内火山活动稀少,排除了火山灰等外源物质的干扰,使得原地残积的物质来源特征更为清晰[24]。地中海沿岸地区的地质背景则为外源物质的输入提供了有利条件。该区域地处非洲板块与欧亚板块的碰撞带,阿尔卑斯-亚平宁造山运动剧烈,导致大量的硅质碎屑物质(如石英、长石)裸露地表,成为风成搬运的重要物源[26]。同时,撒哈拉沙漠的广泛分布的干燥气候,使得大量细颗粒粉尘能够被风力扬起,经大气环流输送至地中海沿岸。此外,地中海作为连接大西洋与印度洋的重要通道,其周边的河流(如尼罗河、波河)

也可将部分陆源碎屑物质搬运至沿岸地区,为红土形成提供补充物源[13]。而该区域碳酸盐岩的不溶物含量普遍低于1%,且风化作用不充分,难以形成足量的原地残积物质,进一步凸显了外源物质输入的必要性[35]。

3.2. 研究方法的对比与未来技术发展方向

碳酸盐岩上覆红土成因研究的进展,离不开研究方法的不断创新与完善。不同研究方法具有各自的优势与局限性,通过多元方法的融合应用,才能更全面、精准地揭示红土的成因机制。对比分析现有研究方法的特点,明确未来技术发展方向,对推动该领域研究的深入开展具有重要意义。

野外剖面调查是红土成因研究的基础方法,其优势在于能够直观观察红土的宏观特征(如厚度、颜色、层理结构)、与下伏基岩的接触关系,以及剖面中的特殊物质(如铝土矿碎屑、石英颗粒),为成因判断提供直接的宏观证据。矿物学分析方法(如X射线衍射、偏光显微镜观察)能够精准识别红土中的矿物组成与形态特征,揭示矿物的演化规律,为物质来源与风化过程的判断提供关键依据。元素地球化学分析(主量、微量、稀土元素)是红土成因研究的核心方法之一。通过分析元素的含量变化、比值特征(如La/Ce、Zr/Hf)及稀土配分模式,可判断红土的风化程度、物质来源及搬运过程。同位素示踪技术($\delta^{30}\text{Si}$ 同位素等)是近年来红土成因研究的重要创新方向,其优势在于具有极高的物源识别精度,能够有效区分不同端元的物质贡献[24]。

基于现有研究方法的优势与局限性,未来技术发展应朝着“多方法融合、高精度量化、过程化模拟”的方向推进。首先,加强微观分析技术的应用,如扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)结合能谱分析(EDS),可更精准地观察矿物的微观形态与元素分布,揭示矿物演化的微观机制;其次,发展多同位素联合示踪技术,将传统的Sr-Nd同位素与新兴的 $\delta^{30}\text{Si}$ 同位素相结合,建立多维度的物源识别体系,精准量化不同端元的贡献比例。最后,结合数值模拟技术,如建立风化-搬运-沉积的耦合数值模型,模拟地质历史时期红土的形成过程,量化溶蚀速率、堆积速率等关键参数,为解决物质平衡等核心争议提供理论支撑。

4. 结语

本文系统梳理了全球碳酸盐岩上覆红土成因研究的核心进展,深入讨论了红土成因区域分异的驱动因素、核心争议及研究方法的发展方向,通过对现有研究成果的整合与分析,得出以下主要结论:

(1) 碳酸盐岩上覆红土成因呈现显著的区域分异特征,形成了两种主流学说:中国西南喀斯特地区以原地风化残积学说为主导,红土是下伏碳酸盐岩经长期表生风化作用,通过脱钙、铁铝富集等地球化学过程形成的残积产物,野外剖面特征、矿物学组成、元素地球化学及同位素示踪等多维度证据证实了这一成因模式;地中海沿岸地区则以外来搬运沉积学说为核心,红土的物质主体源于远源粉尘(如撒哈拉沙漠、阿尔卑斯造山带)的风力或水力搬运输入,经后期成土作用改造形成,元素比值、粒度分布、重矿物组合等证据明确了外源物质的来源与搬运过程。

(2) 红土成因区域分异是气候条件、地质背景、物源供给及地貌演化等多要素耦合作用的结果。中国西南亚热带季风气候提供了强化学风化条件,稳定的地壳环境与封闭的喀斯特地貌保障了原地不溶残渣的积累与保存;地中海气候的干湿交替特征限制了本地风化,而板块碰撞形成的丰富物源与西风环流的搬运作用,为红土形成提供了充足的外源物质,开阔的滨海地貌则利于外源物质的沉积分布。

(3) 当前红土成因研究的核心争议集中在不溶残渣的贡献能力与物质平衡、物质来源的单一性与多元性、红土化作用的启动条件与演化过程三个方面,其背后隐藏的关键科学问题是物质积累效率的量化、不同物源贡献比例的识别、红土化作用与气候变化的耦合关系等。现有研究方法各有优劣,未来需通过

多方法融合、高精度量化技术与过程化模拟的发展,推动这些科学问题的解决。

总之,碳酸盐岩上覆红土成因研究是一个涉及多学科、多过程的复杂科学问题,随着研究方法的不断创新与跨区域研究的深入开展,未来有望逐步厘清当前的核心争议,建立更为完善的红土成因理论体系,为理解地球表层系统的风化作用、物质循环与环境演化提供重要支撑。同时,红土研究的应用价值也将得到进一步拓展,为碳酸盐岩分布区的资源开发、生态保护与可持续发展提供科学依据。

参考文献

- [1] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 第四版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 163-201.
- [2] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 等. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 99-180.
- [3] Durn, G., Ottner, F. and Slovenec, D. (1999) Mineralogical and Geochemical Indicators of the Polygenetic Nature of Terra Rossa in Istria, Croatia. *Geoderma*, **91**, 125-150. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(98\)00130-x](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(98)00130-x)
- [4] 刘艺琪. 滇东高原石灰岩、玄武岩风化壳储水结构差异及原因研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2024.
- [5] Feng, J., Zhu, L. and Cui, Z. (2009) Quartz Features Constrain the Origin of Terra Rossa over Dolomite on the Yunnan-Guizhou Plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **36**, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.05.003>
- [6] 符必昌, 黄英. 试论碳酸盐岩上覆红土的形成模式及演化趋势[J]. 地质科学, 2003, 38(1): 128-136, 141-142.
- [7] 张连凯, 季宏兵, 刘秀明, 等. 热带地区碳酸盐岩上覆红色风化壳的成因机理及元素演化[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 651-660.
- [8] 张莉, 季宏兵, 高杰, 等. 贵州碳酸盐岩风化壳主元素、微量元素及稀土元素的地球化学特征[J]. 地球化学, 2015, 44(4): 323-336.
- [9] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 中国南方碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展[J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 33-40.
- [10] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(d 辑: 地球科学), 1999, 29(5): 441-449.
- [11] Beckford, H.O., Chu, H., Song, C., Chang, C. and Ji, H. (2021) Geochemical Characteristics and Behaviour of Elements during Weathering and Pedogenesis over Karst Area in Yunnan—Guizhou Plateau, Southwestern China. *Environmental Earth Sciences*, **80**, Article No. 61. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09343-2>
- [12] Goran, D., Ivor, P., Jens, S., et al. (2021) Differences in the Behaviour of Trace and Rare-Earth Elements in Oxidizing and Reducing Soil Environments: Case Study of Terra Rossa Soils and Cretaceous Palaeosols from the Istrian Peninsula, Croatia. *Chemosphere*, **283**, Article 131286.
- [13] Razum, I., Miko, S., Rubinić, V., Hasan, O., Ilijanić, N., Brunović, D., et al. (2025) Modelling End-Member Contributions in Terra Rossa Soils of the Eastern Adriatic Coast Using Heavy Mineral Assemblages Unravels the Role of Aeolian Processes in Their Formation. *CATENA*, **250**, Article 108736. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108736>
- [14] Durn, G., Wacha, L., Bartolin, M., Rolf, C., Frechen, M., Tsukamoto, S., et al. (2018) Provenance and Formation of the Red Palaeosol and Lithified Terra Rossa-Like Infillings on the Island of Susak: A High-Resolution and Chronological Approach. *Quaternary International*, **494**, 105-129. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.11.040>
- [15] 符必昌, 黄英, 方丽萍, 等. 碳酸盐岩上覆红土的成因研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2959-2967.
- [16] Liu, W., Liu, C., Zhao, Z., Xu, Z., Liang, C., Li, L., et al. (2013) Elemental and Strontium Isotopic Geochemistry of the Soil Profiles Developed on Limestone and Sandstone in Karstic Terrain on Yunnan-Guizhou Plateau, China: Implications for Chemical Weathering and Parent Materials. *Journal of Asian Earth Sciences*, **67**, 138-152. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.02.017>
- [17] Chang, C., Song, C., Beckford, H.O., Wang, S. and Ji, H. (2019) Behaviors of Rees during Pedogenetic Processes in the Karst Areas of Southwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **185**, Article 104023. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104023>
- [18] Durn, G., Aljinović, D., Crnjaković, M. and Lugović, B. (2007) Chapter 28 Heavy and Light Mineral Fractions Indicate Polygenesis of Extensive Terra Rossa Soils in Istria, Croatia. *Developments in Sedimentology*, **58**, 701-737. [https://doi.org/10.1016/s0070-4571\(07\)58028-3](https://doi.org/10.1016/s0070-4571(07)58028-3)
- [19] 章明奎, 姚玉才, 邱志腾, 等. 中国南方碳酸盐岩发育土壤的成土特点与系统分类[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(1): 54-65.
- [20] 王振耀, 林清, 赵银军. 喀斯特地区碳酸盐岩风化成土相关问题[J]. 广西师范学院学报, 2019, 36(1): 94-99.

- [21] Wei, X., Ji, H., Li, D., Zhang, F. and Wang, S. (2013) Material Source Analysis and Element Geochemical Research about Two Types of Representative Bauxite Deposits and Terra Rossa in Western Guangxi, Southern China. *Journal of Geochemical Exploration*, **133**, 68-87. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.07.010>
- [22] Ji, H., Wang, S., Ouyang, Z., Zhang, S., Sun, C., Liu, X., *et al.* (2004) Geochemistry of Red Residua Underlying Dolomites in Karst Terrains of Yunnan-Guizhou Plateau. *Chemical Geology*, **203**, 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.08.012>
- [23] Ji, H., Wang, S., Ouyang, Z., *et al.* (2004) Geochemistry of Red Residua Underlying Dolomites in Karst Terrains of Yunnan-Guizhou Plateau. *Chemical Geology*, **203**, 29-50. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.08.013>
- [24] Ji, H., Chang, C., Beckford, H.O., Song, C. and Blake, R.E. (2021) New Perspectives on Lateritic Weathering Process over Karst Area—Geochemistry and Si-Li Isotopic Evidence. *CATENA*, **198**, Article 105022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105022>
- [25] Xiao, Y., Xu, S., Guo, T., Wang, Q. and Wang, P. (2022) Molybdenum Isotopes Behavior in the Dolomite-Terra Rossa Weathering System. *Geochemistry International*, **60**, 589-595. <https://doi.org/10.1134/s0016702922060106>
- [26] Muhs, D.R., Budahn, J., Avila, A., Skipp, G., Freeman, J. and Patterson, D. (2010) The Role of African Dust in the Formation of Quaternary Soils on Mallorca, Spain and Implications for the Genesis of Red Mediterranean Soils. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 2518-2543. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.04.013>
- [27] 李景阳, 王朝富, 樊廷章, 等. 碳酸盐岩残积红土的结构、构造特征及其成因研究[J]. 中国岩溶, 1995(1): 31-39.
- [28] Sandler, A., Meunier, A. and Velde, B. (2015) Mineralogical and Chemical Variability of Mountain Red/brown Mediterranean Soils. *Geoderma*, **239**, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.008>
- [29] Amit, R., Enzel, Y. and Crouvi, O. (2020) Quaternary Influx of Proximal Coarse-Grained Dust Altered Circum-Mediterranean Soil Productivity and Impacted Early Human Culture. *Geology*, **49**, 61-65. <https://doi.org/10.1130/g47708.1>
- [30] Durn, G., Perković, I., Razum, I., Ottner, F., Škapin, S.D., Faivre, S., *et al.* (2023) A Tropical Soil (Lixisol) Identified in the Northernmost Part of the Mediterranean (Istria, Croatia). *CATENA*, **228**, Article 107144. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107144>
- [31] Razum, I., Rubinić, V., Miko, S., Ružičić, S. and Durn, G. (2023) Coherent Provenance Analysis of Terra Rossa from the Northern Adriatic Based on Heavy Mineral Assemblages Reveals the Emerged Adriatic Shelf as the Main Recurring Source of Siliciclastic Material for Their Formation. *CATENA*, **226**, Article 107083. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107083>
- [32] 任标, 刘琦, 白友恩. 石漠化地区碳酸盐岩风化特性的淋溶实验研究[C]//中国地质学会. 2019年全国工程地质学术年会论文集. 2019: 440-447.
- [33] 李景阳, 王朝富, 樊廷章. 试论碳酸盐岩风化壳与喀斯特成土作用[J]. 中国岩溶, 1991(1): 32-41.
- [34] Micheletti, F., Fornelli, A., Spalluto, L., Parise, M., Gallicchio, S., Tursi, F., *et al.* (2023) Petrographic and Geochemical Inferences for Genesis of Terra Rossa: A Case Study from the Apulian Karst (Southern Italy). *Minerals*, **13**, Article 499. <https://doi.org/10.3390/min13040499>
- [35] Zupančič, N., Turniški, R., Miler, M. and Grčman, H. (2018) Geochemical Fingerprint of Insoluble Material in Soil on Different Limestone Formations. *CATENA*, **170**, 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.040>