



滇西南沧源岩溶洞穴硝洞堆积物来源分析

石林, 杨青, 刘连文, 张晋, 郑妍, 张俞, 杨万书, 邹梓宁, 郑洪波

Sources of karst cave deposits in Xiaodong Cave in Cangyuan, Southwest Yunnan

SHI Lin, YANG Qing, LIU Lianwen, ZHANG Jin, ZHENG Yan, ZHANG Yu, YANG Wanshu, ZOU Zining, and ZHENG Hongbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024011701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

安徽东至华龙洞洞穴发育与古人类生存环境

CAVE DEVELOPMENT AND ENVIRONMENTAL BACKGROUND FOR HOMININ OCCUPATION AT HUALONGDONG CAVE, DONGZHI, ANHUI PROVINCE

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 169–179

雅浦海沟南缘海底表层矿物碎屑粒度特征及其物源指示

Grain-size characteristics of the surface clastic sediments on the southern margin of the Yap Trench and their provenance implications

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 46–57

鸭绿江口沉积粒度特征及其对沉积环境演化的指示

CHARACTERISTICS OF SEDIMENT GRAIN SIZE AT YALU RIVER ESTUARY AND IMPLICATIONS FOR DEPOSITIONAL ENVIRONMENT

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 58–66

海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

Grain size distribution of surface sediments in the area off southeast Hainan Island and its implications for environmental interpretation

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 64–74

辽南地区金州西团瓢湖沼相沉积物粒度化学特征及环境意义

Grain-size and chemical characteristics of the lacustrine deposits from the Xi Tuanpiao profile in Jinzhou, southern Liaoning province and their environmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 193–205

渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示

CLAY MINERALS DISTRIBUTION PATTERN IN SURFACE SEDIMENTS OF WESTERN BOHAI AND THEIR PROVENANCE IMPLICATIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 51–58



关注微信公众号，获得更多资讯信息

石林, 杨青, 刘连文, 等. 滇西南沧源岩溶洞穴硝洞堆积物来源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 81-96.

SHI Lin, YANG Qing, LIU Lianwen, et al. Sources of karst cave deposits in Xiaodong Cave in Cangyuan, Southwest Yunnan[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 81-96.

滇西南沧源岩溶洞穴硝洞堆积物来源分析

石林¹, 杨青^{1,2}, 刘连文³, 张晋⁴, 郑妍⁵, 张俞¹, 杨万书¹, 邹梓宁¹, 郑洪波¹

1. 云南大学云南省地球系统科学重点实验室, 昆明 650500

2. 云南大学云南省教育厅数字人文技术研发与应用重点实验室, 云南大学历史与档案学院, 昆明 650032

3. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

4. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

5. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

摘要: 岩溶洞穴是第四纪时期古人类活动的重要场所。开展岩溶洞穴碎屑沉积物的沉积特征及物质来源分析, 对其沉积环境演变历史及古人类活动研究都具有重要意义。本文在了解硝洞洞穴及其周围不同沉积物黏土矿物特征的基础上, 结合硝洞洞穴沉积物的粒度和矿物学等特征对其物质来源进行了分析。结果表明: 硝洞洞穴沉积物的主要来源为洞穴外地表较高处的沉积物, 其通过片流作用被带入洞穴内进行堆积。其次, 还同时堆积有少量灰岩不溶性物质及其经历进一步风化成壤作用后形成的物质, 总体可能存在 4 次进一步的风化成壤作用。此外, 也有洞壁崩塌的石灰岩角砾和岩块参与堆积, 总体存在 4 次大量灰岩角砾或岩块参与堆积过程, 而最近一次的堆积作用, 显然受到了人类活动的影响。

关键词: 岩溶洞穴堆积; 堆积物来源; 粒度; 黏土矿物

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024011701

Sources of karst cave deposits in Xiaodong Cave in Cangyuan, Southwest Yunnan

SHI Lin¹, YANG Qing^{1,2}, LIU Lianwen³, ZHANG Jin⁴, ZHENG Yan⁵, ZHANG Yu¹, YANG Wanshu¹, ZOU Zining¹, ZHENG Hongbo¹

1. Yunnan Key Laboratory of Earth System Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Digital Humanities Technology Research and Development and Application, School of History and Archives, Yunnan University, Kunming 650032, China

3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

4. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

5. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

Abstract: Karst caves are valuable locations for studying prehistoric human activities during the Quaternary Period. Analyzing the depositional characteristics and provenance of clastic deposits in karst caves is crucial for understanding the evolutionary history of the depositional environment and shedding light on past human behaviors. Xiaodong Cave in Cangyuan, Southwest Yunnan was studied to unveil the source of clastic sediments. The grain size and mineralogical features of various clay minerals within and around the cave were analyzed. Results show that the cave sediments came mainly from the sediments in higher places outside the cave through sheet flow as shown in grain size characteristics. In addition, a small amount of insoluble material from limestone and materials formed after further weathering and pedogenesis were also accumulated. Overall, there might be four periods of further weathering and pedogenesis. Moreover, there were limestone breccias and rock debris fallen off from cave walls, from which four events of accumulation of limestone breccia or debris were recognized. The latest accumulation was obviously affected by human activities, to which sufficient attention should be paid in research works.

Key words: karst cave deposits; source tracking; grain size; clay minerals

资助项目: 国家自然科学基金项目“青藏高原东南缘晚更新世以来地球关键带演化过程”(42361144879), “青藏高原及周缘新生代大陆风化沉积记录研究”(41991323); 青藏高原第二次综合科学考察研究任务七“高原生长与演化”专题四“碰撞以来古地理格局与构造地貌过程”(2019QZKK0704); 云南省科技领军人才项目“建设云南省地球系统科学重点实验室”(202005AB160008); 云南省基础研究计划项目重点项目“滇西南晚更新世和平文化人类植物利用及环境适应性”(202301BF070001-005); 兴滇英才支持计划“滇西史前人类植物资源利用及其环境适应性”、Queensland-Chinese Academy of Sciences Collaborative Science Fund“Past Asian-Australian Monsoon Variability”(QCAS036, 045GJHZ2023001MI)

作者简介: 石林(1998—), 女, 硕士研究生, 环境地质学专业, E-mail: irene_lshi@163.com

通讯作者: 杨青(1984—), 女, 副教授, 主要从事过去全球变化与人类活动、新生代植被与古气候变化研究, E-mail: yangqing@ynu.edu.cn

收稿日期: 2024-01-17; **改回日期:** 2024-03-10. 文凤英编辑

中国岩溶地貌(喀斯特)十分发育,碳酸盐岩出露面积约 90.7 万 km^2 ,其中西南地区以云、贵、桂等地为主体,分布面积约 50 万 km^2 ^[1]。喀斯特地区的洞穴数以万计,在世界上也是十分突出的。洞穴作为天然的沉积场所,能堆积各种物理、化学、生物成因的沉积物,且一些洞穴在山区还可以成为易保存第四纪堆积物的场所^[2],沉积厚度可达数十米,时间跨度长,可追溯至数百万年。洞穴不仅是重要的古人类遗址或化石地点,保存有对了解人类进化、适应、行为等至关重要的信息,如在我国许多洞穴内发现了不少人类进化各阶段的化石、大量的石器文化遗物和用火痕迹^[3-14],同时也是岩溶发育、全球变化等研究的重要信息载体。洞穴中堆积物的充填发展往往随着古环境的变化而变化,因此蕴含着洞穴对周围环境和地貌变化响应的丰富信息,能很好地反映洞穴发育演化过程及气候变化规律,为第四纪研究提供了独特的环境记录^[15]。因此,过去洞穴沉积物已经吸引了大量考古学、地球科学等领域的研究者。然而,目前关于洞穴沉积物仍然有很多工作亟待开展,如过去通常集中于对洞穴化学成因的沉积物(如石笋)这一良好的古气候载体进行研究,而对洞穴物理成因的沉积物,如碎屑沉积物的关注较少。在过去几十年里,洞穴物理成因的碎屑沉积物已经被认为是重建地表和地下景观古环境条件的一个重要载体,这是目前广泛开展古生物学和考古学研究的重要需求^[16]。如对南京汤山葫芦洞洞穴碎屑堆积及演化这一薄弱环节开展的系统研究,为研究岩溶洞穴演化、探讨古人生存时代与环境、开展考古挖掘提供了新的视角和方法^[17-20]。

研究洞穴碎屑沉积物具有挑战性,尽管其与地表的沉积过程类似,但洞穴中特殊的沉积动力也会导致其具有复杂的地层结构^[15,21-22]。一般认为洞穴碎屑沉积物有两种可能的来源^[23-24]:本地来源,主要为洞穴角砾、基岩风化产物等;外部来源,外部沉积物被搬运到洞内沉积。一些研究表明,洞穴碎屑沉积物的化学和矿物组成与基岩的不溶性残留物的差异或相似性是了解洞穴沉积物起源的良好标志^[25-27]。此外,一些其他沉积学特征,如缺乏指示搬运过程的沉积结构、无河流搬运碎屑物质的证据、广布覆盖洞穴基岩的红色黏土等,可推断为原位沉积^[22,25-27]。因此,综合分析洞穴沉积物的沉积学和矿物学特征是判定其物质来源的有效手段。

粒度作为反映沉积物的沉积学特征,如沉积动力、搬运条件、沉积环境等的重要物理代用指标,

目前在黄土^[28-33]、湖泊沉积物^[34-38]、风成沉积物^[39-43]、深海沉积物^[44-48]等研究中广泛应用,并取得了一定的成果。洞穴沉积物的粒度分布特征受气候条件、水文特征和沉积环境等因素的影响,开展洞穴沉积物的粒度分析对于追溯洞穴沉积物来源、形成原因,了解洞穴沉积环境演变过程具有重要意义。例如,对大连金远洞的粒度分析,得出洞穴红色堆积物以风力沉积为主,后经流水搬运,且在环境干冷时以近源沉积为主,暖湿时以远源为主^[49];贵州山王洞的粒度分析表明洞穴冲积物具有河流沉积物特点,洞穴古河道河流总体水位稳定,并通过粒径大小推断其可能存在两个较大降雨阶段和一个较小降雨阶段^[50];对北盘江唐家大洞沉积物的粒度分析及基岩溶蚀试验,揭示了北盘江唐家大洞地下洞穴沉积物的沉积环境相对稳定,沉积过程中可能存在降雨量大小两种情况且二者相互交替具有循环性,主要受水文环境与碳酸盐岩溶蚀程度的影响,溶蚀试验表明北盘江喀斯特地表侵蚀及溶蚀较严重,受水流作用影响洞穴主要沿地层裂隙方向以纵向发育为主^[51]。

黏土矿物不仅是母岩风化的直接产物,在各种沉积物和沉积岩中普遍存在,而且是气候变化、环境介质等作用的结果。因此,其分布特征、含量变化、组合规律等对阐明沉积物的沉积作用、指示沉积物物质来源和搬运过程、反演古气候和古环境变化以及划分地层等方面具有重要意义^[52-55]。该指标在洞穴沉积物中也有较好的应用,如利用黏土矿物指标或结合地球化学元素、粒度、孢粉等指标,可了解洞穴堆积物形成的古地理环境^[56-57]、洞穴的发育与古人类生存环境的关系^[58]、洞穴沉积物来源^[59-61]等。

云南位于热带-亚热带地区,碳酸盐岩遍布,曾发现有许多重要的洞穴遗址,但关于该地区洞穴沉积物的沉积学研究较少。本研究选取位于滇西南沧源东北部的硝洞(目前发现的已知最早的和平文化遗址^[13])作为研究对象,通过科学钻探获取了硝洞厚达 20.3 m 的洞穴碎屑沉积物,并采集了洞穴周边地表沉积物样品 9 个,提取洞穴钻孔沉积物、灰岩及洞穴周边地表沉积物中的黏土矿物,利用 X 射线衍射(XRD)技术分析了洞穴沉积物、灰岩与其周边环境表层沉积物黏土矿物的特征,并结合洞穴沉积物的岩性、粒度、灰岩酸不溶物含量等特征进行综合分析,探讨并明确了硝洞洞穴沉积物的来源,为后续结合沉积年代学,探究其沉积环境演变过程以及其堆积发展对古人类活动的影响提供了参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

硝洞(23.298°N、99.493°E, 1326 m)地处我国西南边陲,位于云南省西南部临沧市沧源佤族自治县(后简称沧源)东北部的勐省镇农克村(图1a)。勐省镇^[62]处于西部满坎山隆起和东部勐省坝沉陷地带形成的西部河谷山地和东部宽谷盆地,地形以湖泊沉积的中切中山宽谷盆地为主,地势自西向东倾斜,最高峰位于满坎村与糯良怕拍村交界处,海拔2097 m;最低点位于南碧河与拉勐河交汇处,海拔

932 m。区域由多块碎小的板块组成,又因地壳活动较为频繁,地质构成复杂,出露有多种地层,其中石炭系、二叠系的石灰岩、喀斯特地貌遍布(图1b)。区域河流属澜沧江水系,主要河流有南碧河、拉勐河、挡坝河、贺勐河、小黑江等(图1a)。

区域气候类型属亚热带山地季风型气候,多年平均气温为17.7℃,其中坝区和山间谷地带气候炎热;多年平均降水量为1747.2 mm,其中干季(11月—次年4月)受印度半岛北部大陆或沙漠地区的平直西风气流控制,历年平均降水为223.9 mm,雨季(5—10月)受来自赤道海洋西南季风和来自热带海洋的东南季风影响,历年平均降雨量为1523.3 mm,6、7月最大(图2)。

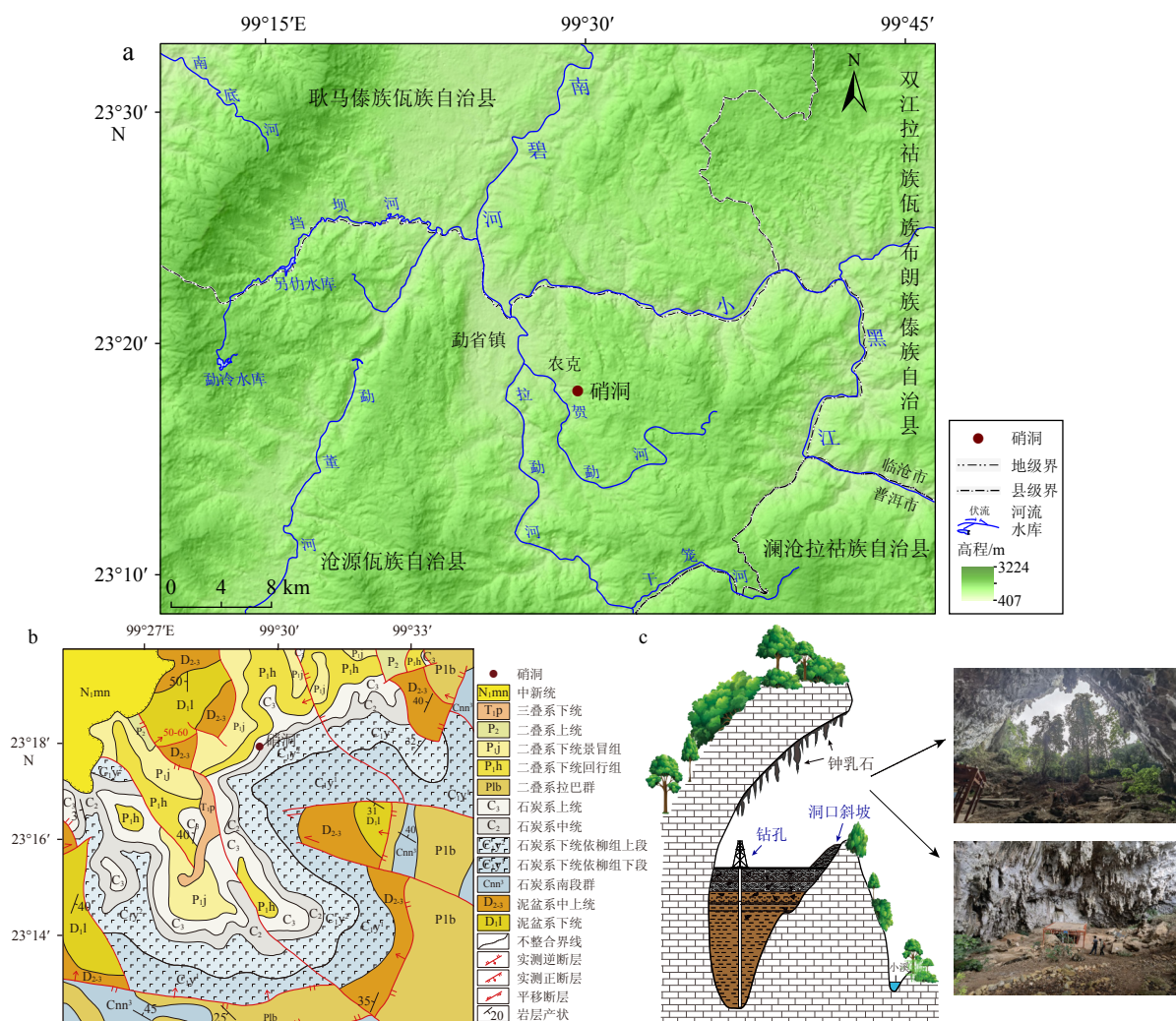


图1 研究区概况

a: 研究区地理位置图; b: 1 : 20 万区域地质图 (数据来源: 地质科学数据出版系统 <http://dcc.ngac.org.cn/>)^[63]; c: 硝洞剖视图(左)、洞内望向洞口照片(右上)、洞口望向洞内照片(右下)。

Fig.1 Overview of the study area

a: Geographical location of study area; b: regional geological map in the scale of 1:200 000 (Data source: Geoscientific Data & Discovery Publishing System, <http://dcc.ngac.org.cn/>)^[63]; c: Sectional view of Xiaodong Cave (left), viewing from the inside out (upper right), viewing from the outside in (lower right).

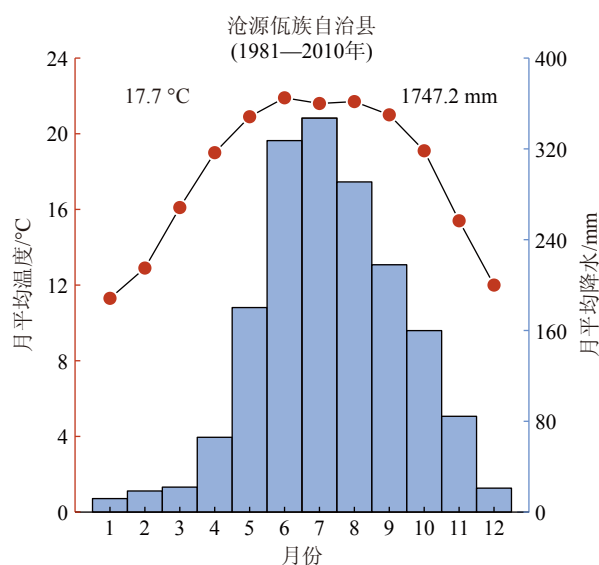


图2 沧源地区气温与降水示意图

数据来源: 中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>。

Fig.2 Temperature and precipitation in the Cangyuan region

Data source: China Meteorological Data Service Centre, <http://data.cma.cn/>.

硝洞位于农克村东南面约 5 km 处,在拉勐河二级支流贺勐河(公噶河)西岸的山腰上,洞口高出河面约 15 m,面向东北,高约 50 m,宽约 60 m,深约 40 m^[64],为一个由石炭系灰岩形成的巨型岩厦,洞口至岩壁为一较陡的斜坡,洞内宽而平整(图 1c)。贺勐河为岩帅镇班色山及团结乡东米山的两条支流在农南寨角汇合而成,呈西北流向,主河长 21.25 km,径流面积 183.92 km²。目前,硝洞山腰下的河流水流量极小,且于 2019 年在上游竣工完成英永水库。

1.2 研究材料

1.2.1 钻孔岩芯样品的采集

本研究中的硝洞 ZK2 孔为 2021 年 12 月使用 XY-150 型岩芯钻机在硝洞洞穴内进行科学钻探作业取得。该钻孔岩芯总进尺约 20.30 m,总取芯率约 84.48%。钻孔底部已到基岩,为硝洞洞穴沉积提供了完整记录。

硝洞 ZK2 孔岩芯沉积物整体以粉砂质黏土为主,颜色呈红褐色与浅红褐色交替变化,上部 2.80 m 为人类活动层,底部约 16 m 以下为灰岩碎块。钻孔剖面及详细岩性描述见图 3、图 4。本研究以约 10 cm 间距采集了钻孔沉积物样品 148 个进行粒度和黏土矿物分析,采集钻孔中深度分别为 0.22、4.58、10.65、14.70 m 的由洞壁掉落的灰岩角砾或岩块样品 4 个进行黏土矿物分析,深度分别为 0.22、0.96、6.14、6.33、10.65、14.70 m 的由洞壁掉落的灰岩角

砾或岩块样品 6 个进行岩石溶蚀试验。

1.2.2 洞穴周边表层及河流沉积物样品的采集

分别于 2020 年 11 月和 2023 年 6 月前往勐省镇农克村采集硝洞洞穴周边表层沉积物及河流沉积物样品共 9 个(表 1),其中 S1—S6 采集于洞外山体不同海拔高度的地表,S7 采集于洞外山体海拔低于洞穴的河流沉积物,S8 采集于硝洞洞口稀疏植被下的岩缝中,S9 采集于硝洞洞内斜坡一灰岩落石的风化产物。所取表层沉积物样品皆为取样点深度 20 cm 以下的沉积物。

1.3 研究方法

1.3.1 粒度

本文对采集的 148 个钻孔沉积物样品进行了粒度分析。样品粒度测量在云南大学云南省地球系统科学重点实验室完成,测量仪器为英国 Malvern 公司 Mastersizer 3000 型激光粒度仪,粒径测量范围为 0.01~3500 μm,重复测量的相对误差小于 3%。实验步骤为:称取约 0.3 g 样品放入试管中,缓慢加入浓度为 30% 的 H₂O₂ 溶液 10 mL,在恒温水浴锅中以 60℃ 加热,直至样品完全反应除去有机质,静置 24 h,加入去离子水超声并离心(转速 4000 r/min, 10 min)多次,直至洗净样品;缓慢加入浓度为 10% 的 HCl 溶液 10 mL,继续加热,直至反应完全除尽碳酸盐胶结物,静置 24 h,将样品洗至中性;加入 10 mL 0.05 mol/L 的 (NaPO₃)₆ 溶液,超声振荡 10 min 后吸取适量样品进行测试,每个样品测试 3 次,仪器自动取平均值。

样品的粒度参数采用 Mcmamus^[65] 提出的矩值法计算,各参数的定性术语描述采用 Blott 和 Pye^[66] 修改后的标准,粒级标准采用 Udden-Wentworth^[67-68] 粒级标准。计算粒度参数时需要将粒径单位转换为 Φ,转换公式为 $\Phi = -\log_2 d$,其中 d 为 mm 单位粒径值。 $C-M$ 图使用 QGrain 软件进行绘制^[69]。

1.3.2 黏土矿物

本文利用 X 射线衍射方法(XRD)对钻孔沉积物、钻孔灰岩及表层沉积物中黏土粒级组分(< 2 μm)进行了黏土矿物的定性、半定量分析。测试分析在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室完成,使用仪器为德国布鲁克公司 D8 Advance 衍射仪。仪器参数和工作条件为 CuKα 辐射,管压 40 kV,管流 45 mA。

沉积物黏土组分的提取流程:称取约 2 g 样品放入 250 mL 离心瓶中,缓慢加入浓度为 15% 的 H₂O₂ 溶液 30 mL,待反应平静后,在 60℃ 恒温水浴锅中

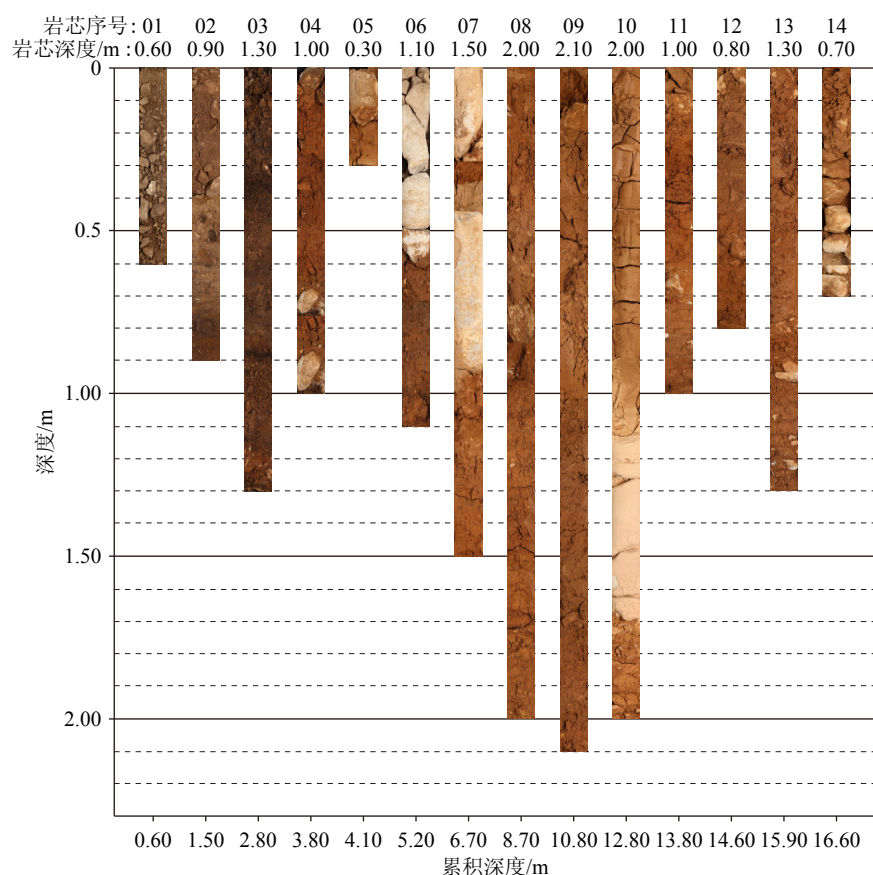


图 3 硝洞 ZK2 孔剖面图

Fig.3 Profile picture of Core ZK2 at Xiaodong Cave

加热 1 h 以上, 直至反应完全除去有机质; 加入浓度为 25% 的 CH_3COOH 溶液 30 mL, 继续加热 1 h 以上, 直至除尽碳酸盐组分; 加入去离子水超声并离心 (转速 3500 r/min, 10 min) 多次, 直至样品中性; 加入 0.05 g $(\text{NaPO}_3)_6$ 使样品发生抗絮凝作用, 然后超声分散样品; 使用离心法提取黏土^[70]; 向提取出来的悬浮液样品中加入 0.2 g 无水 CaCl_2 , 离心并倒掉上清液; 制作定向薄片, 并自然晾干。

灰岩黏土组分的提取流程: 为获得足量的物质来提取黏土矿物, 称取约 200 g 的灰岩样品, 洗净烘干后, 将其机械破碎, 筛掉其中较细的成分, 选取粒径较大的灰岩碎块放入 1000 mL 的离心瓶中, 向样品中加入 25% 的 CH_3COOH 溶液直至灰岩全部溶解 (为加快反应, 使用 60℃ 恒温水浴锅不断加热), 然后将溶解得到的物质离心 (转速 3500 r/min, 10 min) 洗净; 向洗净物质中加入浓度为 15% 的 H_2O_2 溶液去除有机质, 再次离心 (转速 3500 r/min, 10 min) 洗净, 加入 0.05 g $(\text{NaPO}_3)_6$ 使样品发生抗絮凝作用, 然后超声分散样品; 使用离心法提取黏土^[70]; 向提取出来的悬浮液样品中加入 0.2 g 无水 CaCl_2 , 离心并倒掉上清液; 制作定向薄片, 并自然晾干。

上机测试: 将制成的定向薄片在 60℃ 乙二醇蒸汽中饱和 24 h 后分别扫描测试两遍, 第一遍扫描范围为 $3^\circ \sim 30^\circ (2\theta)$, 步长为 0.02° , 步频为 0.5 s/step; 第二遍扫描范围 $24^\circ \sim 26^\circ (2\theta)$, 步长 0.01° , 步频 0.5 s/step, 以得到绿泥石 (3.54 Å) 和高岭石 (3.58 Å) 的相对含量。

数据分析: 使用 Topas 2P 软件对经过抠背景、平滑后的 EG 曲线进行拟合, 得到主要黏土矿物的衍射峰位置及强度, 进而计算出各黏土矿物的相对百分含量^[71]、伊利石化学指数和伊利石结晶度^[52]。

1.3.3 灰岩溶蚀试验

为获得硝洞灰岩样品中所含不溶性物质质量的多少, 对其进行溶蚀试验。实验步骤为: 首先将所取灰岩样品洗净并烘干; 然后将其机械破碎, 过筛去掉较为细碎的细粉末后, 称取粒径较大的灰岩碎块约 30 g 放入 1000 mL 离心瓶中, 加入浓度为 25% 的 CH_3COOH 溶液直至样品完全溶解 (期间为加速反应不断使用 60℃ 恒温水浴锅进行加热), 同时记录样品的溶解情况, 最后将样品溶解得到的物质离心洗至中性, 并烘干称重。

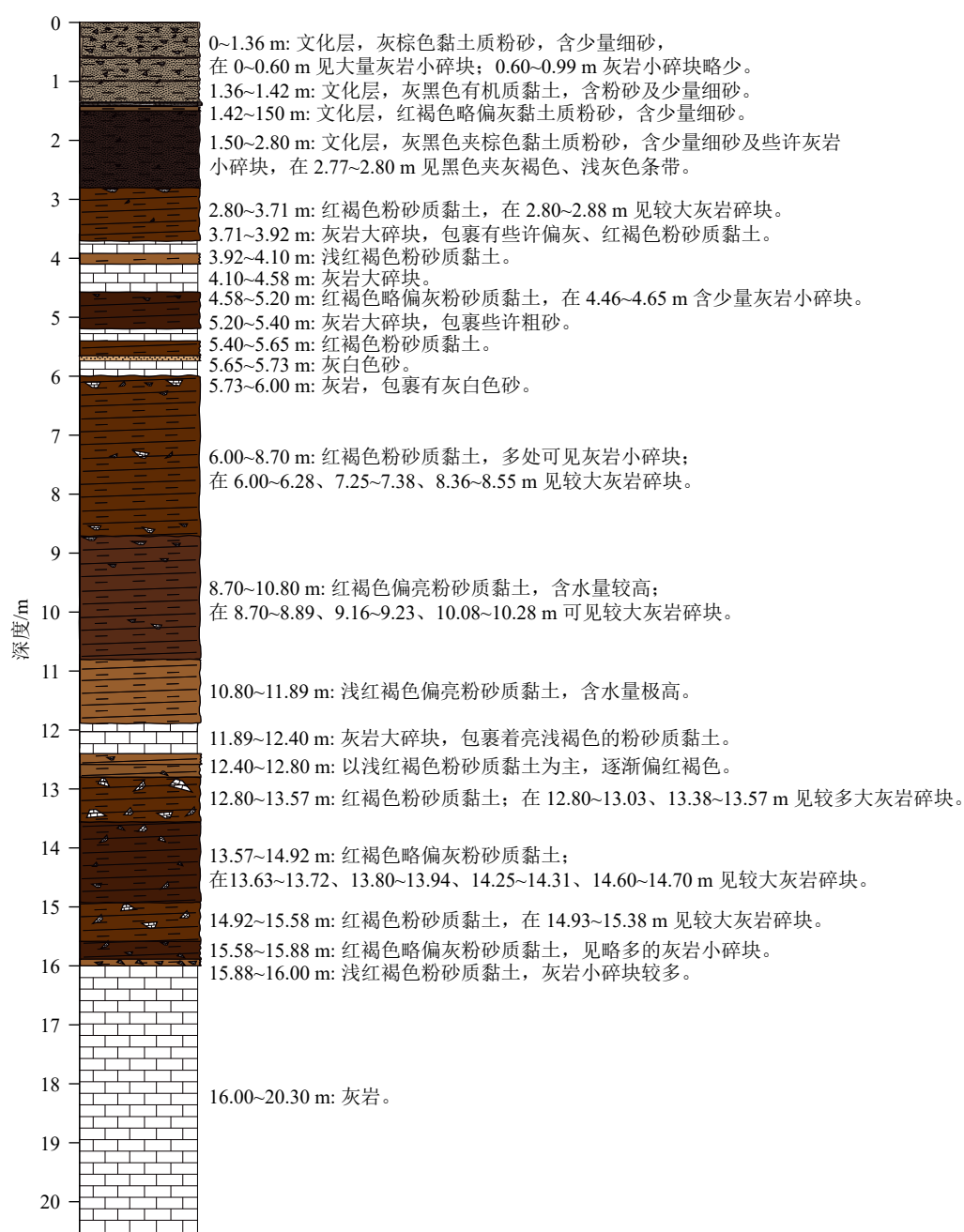


图 4 硝洞 ZK2 孔岩性描述图

Fig.4 Lithological sequence of Core ZK2 at Xiaodong Cave

2 结果

2.1 硝洞 ZK2 孔沉积物粒度分析

硝洞 ZK2 孔沉积物各粒径组分分布结果(图 5)显示,黏土含量为 2.95%~23.38%,平均为 12.67%;粉砂含量为 69.40%~94.20%,平均为 81.13%,其中细粉砂含量为 31.32%~65.66%,平均为 45.32%,中粉砂含量为 12.27%~36.74%,平均为 24.03%,粗粉砂含量为 2.85%~23.04%,平均为 11.78%;砂含量为

0.33%~16.75%,平均为 6.21%。样品总体以粉砂为主,平均含量占 80% 以上,其次为黏土,砂的含量最少。

硝洞 ZK2 孔沉积物的粒度特征为了解堆积物的沉积成因提供了依据。本文选用的粒度参数有平均粒径、分选系数、偏度、峰度(图 5)。平均粒径代表沉积物粒度分布的集中趋势,能够反映搬运营力的平均动能,硝洞 ZK2 孔样品的平均粒径范围为 5.63~7.08 Φ (均值 6.44 Φ),总体偏于 $>6 \Phi$ 一侧,表明沉积动能较低能;分选系数用标准偏差表示,代表沉积物的分选程度,硝洞 ZK2 孔样品的分选系数总体在 1~2 之间,样品整体分选较差;偏度

表 1 硝洞周边表层沉积物采样点信息
Table 1 Sampling information of surface sediments near around Xiaodong Cave

样品编号	海拔/m	地理位置	地层代号	采样时间	所处高度与洞穴位置比较
S1	1375	23.2966°N、99.4937°E	C ₂	2020.11	高于洞穴
S2	1366	23.2966°N、99.4946°E	C ₂	2020.11	高于洞穴
S3	1409	23.2958°N、99.4931°E	C ₂	2020.11	高于洞穴
S4	1308	23.2987°N、99.4938°E	C ₃	2020.11	低于洞穴
S5	1318	23.2974°N、99.4945°E	C ₂	2023.06	接近洞穴高度
S6	1287	23.2981°N、99.4944°E	C ₂	2023.06	低于洞穴
S7	1271	23.2985°N、99.4942°E	C ₂	2023.06	洞外下方河流
S8	1314	23.2986°N、99.4931°E	C ₃	2023.06	洞口
S9	1314	23.2986°N、99.4931°E	C ₃	2023.06	洞内斜坡

注: C₂—石炭系中统: 白云岩、白云质灰岩夹鲕状灰岩; C₃—石炭系上统: 灰岩夹生物碎屑灰岩, 鲕状灰岩及白云质灰岩。

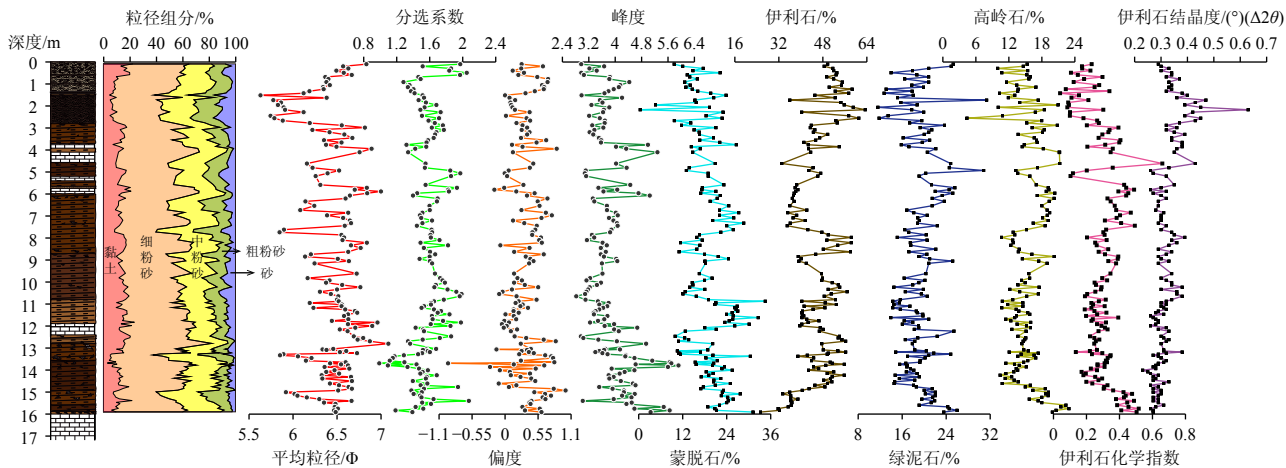


图 5 硝洞 ZK2 孔沉积物各组分含量、粒度参数、黏土矿物含量及其特征参数综合图
Fig.5 The grain size composition, grain size parameters, contents of clay minerals, and characteristic parameters in Core ZK2 at Xiaodong Cave

表示沉积物粒度频率曲线的对称性, 硝洞 ZK2 孔样品的偏度以近对称和正偏为主, 表明粒径整体近均匀或偏粗; 峰度用于衡量沉积物粒度频率曲线峰形的宽窄陡缓, 反映粒度的集中程度, 硝洞 ZK2 孔样品的峰度为 2.82~5.92, 表明样品粒径分布相对集中。

频率分布曲线能较为直观地显示样品中各粒级的相对含量及其对粒度总的贡献和堆积物粒度的分布特点, 指示堆积物搬运介质的动力特征。硝洞 ZK2 孔样品的粒度频率分布曲线(图 6a)反映了样品的各粒级相对含量、粒度组成差异不大, 粒径主体为 0~12 Φ, 曲线多为近正态分布的多峰态, 粒径的主峰峰值较高, 为 5~7 Φ, 峰形两端有较小拖尾, 细尾峰值为 10~11 Φ, 粗尾端较为低长, 指示较低能的水动力条件。C-M 图是以粒径的 M 值(中值

粒径)为横坐标, C 值(粒径概率累计值 1% 处对应的粗粒粒径大小)为纵坐标的二维散点图, 能够反映沉积物分布的总体特征与水动力情况。C-M 图总共有 9 区, 各个区指示了不同的沉积环境, 其中 I、II、III 与 IX 区沉积物 C 值大于 0 Φ(1000 μm), 以滚动颗粒为主, 缺乏悬浮沉积物; IV、V、VI、VII 与 VIII 区沉积物以均匀悬浮和递变(分级)悬浮沉积为主; T 区为远洋悬浮区, 是最细粒的物质或聚集体。硝洞 ZK2 孔样品在 C-M 图(图 6b)中主要投影在 VII、VIII 区, 以悬浮沉积为主, 分布较为集中, 表明外部沉积动力较弱且稳定。

从以上粒度结果的分析来看, 硝洞 ZK2 孔沉积物总体以细粒组分为主; 从多表现为尖锐的近对称形态及在 C-M 图中的分布情况可知, 沉积物粒度组

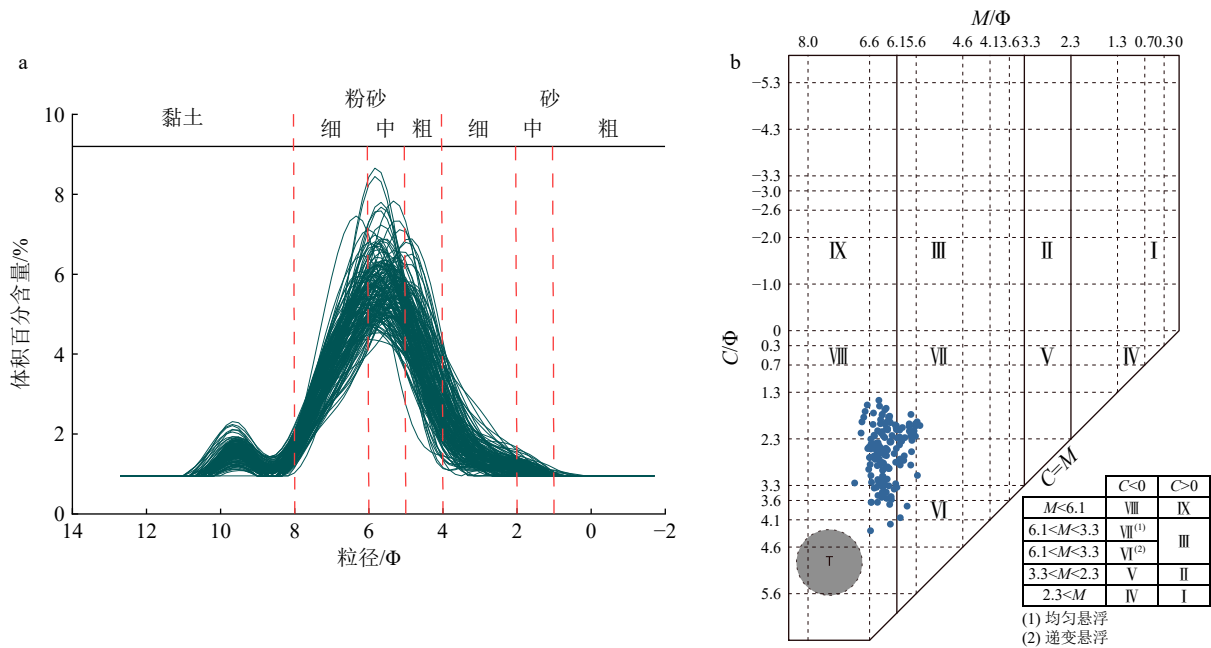


图6 硝洞 ZK2 孔粒度频率分布曲线 (a) 与 C-M 图 (b)

Fig.6 Curves of frequency distribution of grain size and the C-M diagram of Core ZK2 at Xiaodong Cave

分分布相对集中, 沉积环境较稳定, 指示了较低能的沉积动力条件; 样品分选较差可能指示了样品是在多种沉积作用下形成的, 且距离物源区较近; 从频率曲线基本呈多峰分布可知, 沉积物的物质来源可能多样, 但外部沉积动力变化不大。

2.2 黏土矿物分析

2.2.1 硝洞 ZK2 孔沉积物黏土矿物特征

硝洞 ZK2 孔沉积物黏土粒级组分的 X 射线衍射分析结果显示, 其黏土矿物组成(图 7)以伊利石为主, 含量为 25%~63%(平均 46%); 蒙脱石含量为 0~35%(平均 19%); 高岭石、绿泥石含量分别为 4%~23%(平均 15%)、12%~31%(平均 19%)。伊利石化学指数变化范围为 0.04~0.66(平均 0.29), 表明主要为富 Fe-Mg 的伊利石, 物理风化作用较强。伊利石结晶度变化范围为 0.23~0.63° Δ2θ(平均 0.32° Δ2θ), 伊利石结晶度以极好为主, 个别为较好^[52]。

2.2.2 硝洞 ZK2 孔灰岩样品黏土矿物特征

对硝洞灰岩黏土矿物特征的分析, 为判定其是否参与及如何参与洞穴沉积过程提供了重要信息。硝洞 ZK2 孔 4 个灰岩样品酸不溶物黏土粒级组分的 X 射线衍射分析结果(表 2)表明, 硝洞灰岩的黏土矿物以伊利石为主, 并含有少量的高岭石。与较深处的灰岩相比, 样品 HY22 含有更多的高岭石。已有研究表明碳酸盐岩具有复杂的成土过程, 其在受到风化成土作用影响时, 伊利石、高岭石、

绿泥石等风化矿物显现和增加, 碳酸盐岩方解石矿物等减少至消失^[72]。随着风化程度及成土作用的增强, 稳定性矿物(如高岭石)的含量将增加以及出现三水铝石等^[73]。HY22 可能由于埋藏较浅, 受风化作用更强烈或风化时间更长等影响, 促进了成土作用而含有更多的高岭石。

2.2.3 硝洞周边地表沉积物样品黏土矿物特征

洞穴沉积物往往以近源堆积为主, 因而分析洞穴周边沉积物的黏土矿物特征, 能更好地判定洞穴沉积物来源。硝洞洞穴周边表层土壤及河流沉积物样品的 EG 片 X 衍射图谱拟合得到的黏土矿物相对含量(表 2)结果显示, 各样品的黏土矿物含量差异较大, 其中蒙脱石含量变化范围为 0~65%(平均 29%); 伊利石含量变化范围为 0~48%(平均 18%); 绿泥石含量变化范围为 0~52%(平均 22%); 高岭石含量变化范围为 0~55%(平均 31%)。样品的伊利石化学指数变化范围为 0~0.60(平均 0.32), 多表现为富 Fe-Mg 的伊利石, 说明区内伊利石主要产生于较强烈的物理风化环境; 伊利石结晶度指数变化范围为 0~0.46° Δ2θ(平均 0.37° Δ2θ), 可知样品的伊利石结晶程度很好。

表层沉积物样品中, 洞口 S8 和洞内斜坡 S9 两个样品为洞顶掉落的巨大灰岩块风化而成的土壤, 黏土矿物以高岭石、绿泥石为主, 几乎不含伊利石。已有对碳酸盐岩风化壳黏土矿物的形成机理研究表明, 其至少存在 3 个演化序列, 其中顺序风化产物为绿泥石和有序度较高的高岭石及三水铝

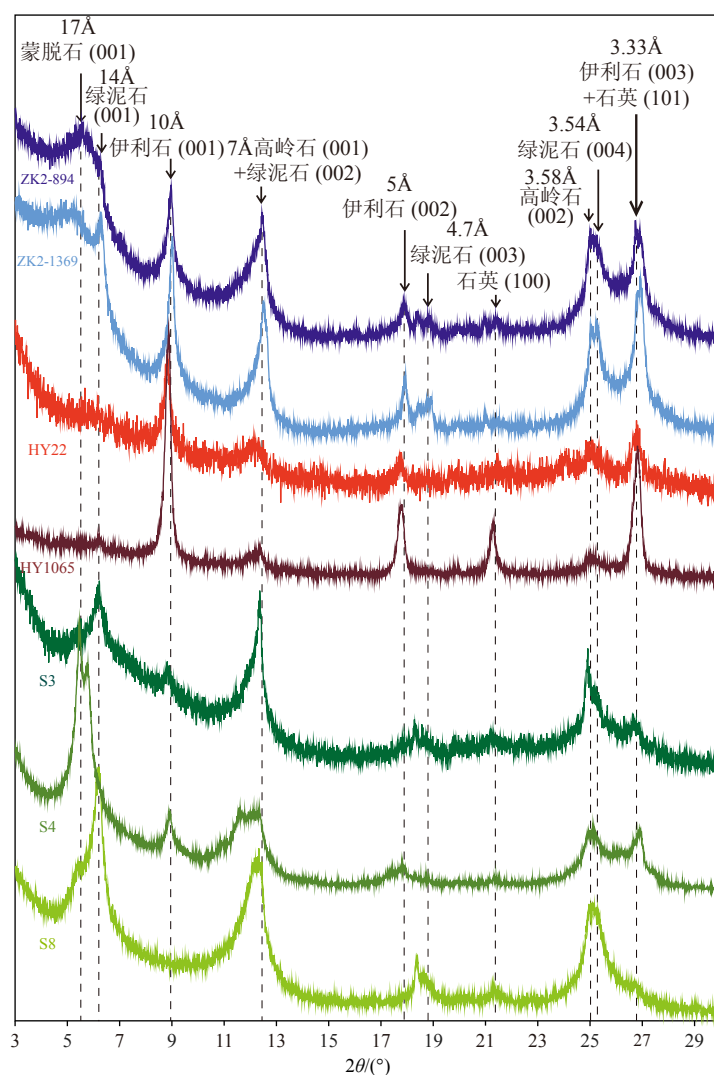


图 7 样品中黏土矿物的典型 X 射线衍射波谱图

Fig.7 Typical X-Ray diffraction spectrum of clay minerals in all samples

石等^[74]。S8、S9 两个样品可能指示了随着风化程度的增加, 灰岩风化形成的不溶残余物中的伊利石逐渐转化为高岭石和绿泥石。河流样品 S7 的黏土矿物以蒙脱石为主, 伊利石、高岭石次之。海拔较低处的 S4、S5、S6 样品中蒙脱石(含蒙脱石混层矿物)含量明显比较高海拔处的 S1、S2、S3 样品高。因此, 从分布上来看, 总体表现为随着海拔的降低, 蒙脱石含量呈增加的趋势, 而伊利石、绿泥石、高岭石含量呈减少的趋势。一般认为, 伊利石形成于气候干冷、淋滤作用弱, 物理风化强烈, 弱碱性的环境下, 由长石、云母等铝硅酸盐矿物在风化脱 K⁺的情况下形成; 绿泥石形成于碱性、淋滤作用不强的环境中, 富集于以物理风化为主、化学风化作用受抑制的地区; 高岭石是在气候温暖潮湿、淋滤作用强、化学风化强烈、酸性的环境中形成; 蒙脱石形成于水溶液流通性较差的碱性环境中, 在干湿交替的气候条件下易形成和富集^[54,75-76]。因此, 由于区域

降水丰富, 植被覆盖度较高, 陡坡水土更容易流失等, 而在地势较低处排水不良, 阻碍了二氧化硅、碱性和碱土离子的流失而发育了较多的蒙脱石。

2.3 硝洞 ZK2 孔灰岩样品溶蚀试验

在洞穴沉积过程中, 基岩风化成壤产生多少贡献, 以及是否为主要沉积来源, 与洞穴灰岩所含不溶性物质质量的多少紧密相关。已有研究表明^[77]: 碳酸盐岩中所含的不溶组分含量很低, 一般在 10% 以下。通常认为若要形成 1 m 厚的土层, 需要风化剥蚀掉数十米, 甚至数百米的碳酸盐岩母岩。硝洞 ZK2 孔灰岩样品的溶蚀试验结果(表 3)显示, 硝洞灰岩样品的不溶性物质含量占比平均约为 0.84%, 不溶组分含量很低。根据样品溶蚀情况, 粗略估算出要在硝洞洞穴内沉积约 16 m 厚的沉积物, 需要风化剥蚀掉数万米的母岩。显然, 以硝洞的情况, 只通过母岩的风化成壤作用不可能为其提供如此

厚层的沉积物。因此,可推断硝洞基岩风化侵蚀而来的沉积物参与了沉积,但不可能是主要的沉积来源。

3 硝洞堆积物的潜在物源分析

地层层序中黏土矿物的变化可能揭示了在洞穴沉积物的形成过程中存在不同的沉积过程和来源。洞穴沉积物中黏粒级组分的黏土矿物结果与从洞穴灰岩及周边表层沉积物中获取的结果具有一定的相似性。对洞穴沉积物中获得的黏土矿物数据进行主成分分析(图 8),并结合周边表层沉积物的黏土矿物特征进行综合分析,以更好地了解洞穴沉积物黏土矿物的变化特征,进而为判定洞穴沉积物来源提供信息。结果(图 8a)显示前两个主成分解释了近 90% 的方差。主成分 1 解释了 55.62%,主要是伊利石的负载和高岭石、绿泥石的正载;第 2 主成分揭示了总方差的 34.33%,主要是蒙脱石的负载。将样品沿着地层层序绘制主要 PC 的因子分数(图 8b),可知随着地层深度的变化,其表现出明显的趋势和变化,表明了不同沉积过程的交替变化。 $F1_{XRD}$ 主要对应于高岭石、绿泥石和伊利石含量的变化, $F2_{XRD}$ 主要对应于蒙脱石含量的变化。通过对洞穴灰岩及周边表层沉积物黏土矿物特征的了解,可知灰岩中的不溶性物质表现为以高伊利石含量为特征,灰岩在经历进一步风化成土作用后表现为高岭石、绿泥石含量增加的特征;海拔较高处的表层沉积物中高岭石、绿泥石、伊利石含量较高,而海拔较低处的表层沉积物中蒙脱石含量增加。在山区由于坡度大,降水丰富,水土极易流失,因而较低海拔处的表层沉积物与较高处的沉积物中蒙脱石含量的变化,在一定程度上反映较高海拔处的沉积物流失到较低处后,由于地势较低处排水不良,进而发育了更多的蒙脱石。综上,认为 $F1_{XRD}$ 可能代表了洞外海拔较高处沉积物与灰岩风化产物都有参与硝洞洞穴的沉积,为一混合堆积结果,而正负得分可以在一定程度上反映灰岩风化的程度,即当灰岩进一步风化时,会产生更多的高岭石、绿泥石,伊利石含量会减少; $F2_{XRD}$ 负得分主要反映了洞外海拔较高处沉积物参与硝洞洞穴的沉积,即蒙脱石含量较高,正得分为混合堆积,在一定程度上反映了较多灰岩风化产物参与堆积。

根据主成分分析结果,大致将硝洞洞穴碎屑沉积物的堆积变化过程划分为 4 个阶段:

阶段 A(16.00~14.80 m):该阶段洞内沉积物主要位于 PC1 轴的正轴,且多分布于 PC2 轴的负轴,

表 2 硝洞 ZK2 孔灰岩及硝洞周边表层沉积物中黏土矿物相对含量及特征参数

Table 2 Relative content and characteristic parameters of clay minerals in the limestone of Core ZK2 at Xiaodong Cave and the surface sediments around Xiaodong Cave

样品 编号	黏土矿物类型及其百分含量/%				伊利石化 学指数	伊利石结晶度/ (°) $\Delta 2\theta$
	蒙脱石	伊利石	绿泥石	高岭石		
HY22	0	67	0	33	0.18	0.30
HY458	0	100	0	0	0.33	0.32
HY1065	0	91	0	9	0.35	0.25
HY1470	0	95	0	5	0.39	0.24
S1	2	48	50	0	0.19	0.44
S2	7	35	21	37	0.29	0.39
S3	5	10	41	44	0.60	0.30
S4	47	23	0	30	0.37	0.33
S5	56	16	0	28	—	0.46
S6	65	14	0	21	—	0.42
S7	62	21	0	17	0.21	0.27
S8	14	0	31	55	\	\
S9	0	0	52	48	\	\

注:“\”表示无,“—”为 S5、S6 样品中伊利石 002 峰受背景影响较大,较难准确拟合。

表 3 硝洞 ZK2 孔灰岩样品溶蚀试验结果

Table 3 Results of dissolution test of limestone samples in the Core ZK2 at Xiaodong Cave

样品编号	灰岩质量/g	酸不溶物含量/g	酸不溶物百分比/%
HY22	32.39	0.31	0.96
HY96	24.40	0.14	0.57
HY614	30.73	0.09	0.29
HY633	32.28	0.01	0.03
HY1065	30.43	0.23	0.76
HY1470	32.50	0.79	2.43

因而可认为该阶段沉积物主要来自于洞外较高处的沉积物。此外,灰岩中不溶性物质可能受到了进一步风化,产生含有较多高岭石、绿泥石的风化产物参与沉积,且在该阶段有较多的洞壁崩塌的石灰岩角砾参与堆积。

阶段 B(14.80~7.50 m):该阶段洞内沉积物多分布于 PC1 的负轴,在 PC2 轴呈明显的 4 次变化分布。综合认为该阶段沉积物主要为洞外较高处的沉积物被携入洞内进行沉积,灰岩的风化较弱。但

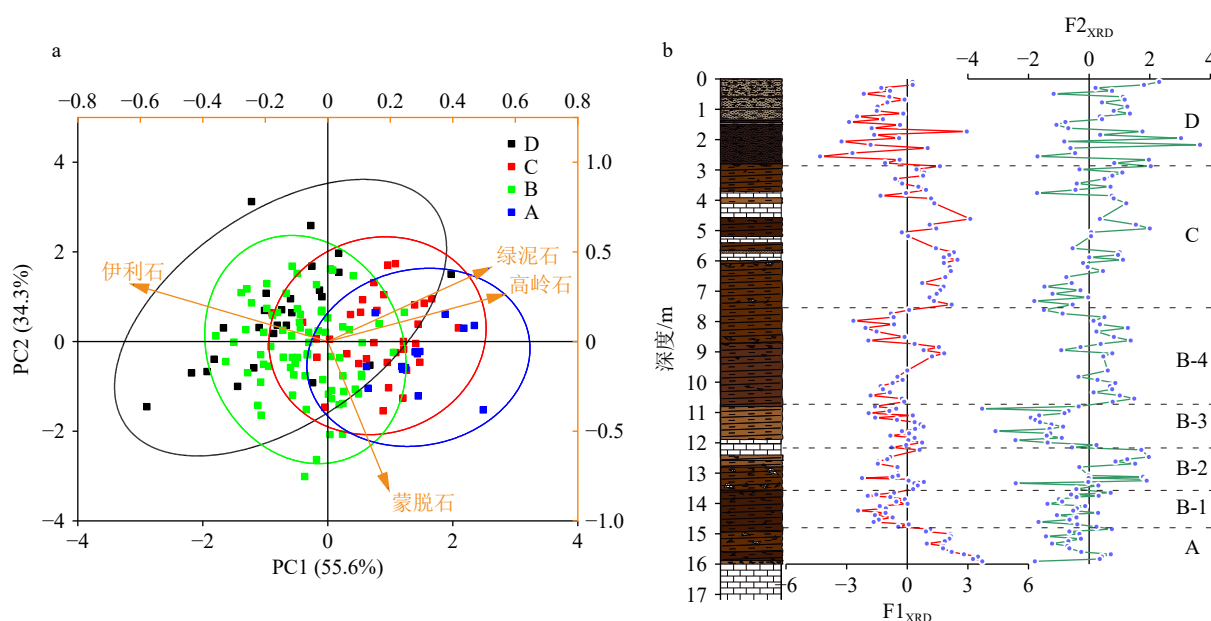


图 8 硝洞 ZK2 孔沉积物样品主成分分析

a: 主成分分析双标图(载荷图+得分图), b: 各样品的主要成分因子得分随深度的垂向变化图。

Fig.8 Principal component analysis of sediments in the Core ZK2 at Xiaodong Cave

a: Biplot of principal component analysis (loading plot and score plot), b: factorial scores of most significant principal components.

在 B-2、B-4 阶段, 可能由于气候原因, 灰岩风化相对增强, 因而有较多的进一步风化产物参与沉积, 且在约 11.90~12.40 m 有洞穴洞壁崩塌的石灰岩岩块参与堆积, B-2 阶段有较多的洞壁崩塌的石灰岩角砾参与堆积。

阶段 C(7.50~2.80 m): 该阶段洞内沉积物主要位于 PC1 的正轴, 且在早期多分布于 PC2 的负轴, 晚期多分布于 PC2 的正轴。综合认为该阶段灰岩风化总体较强, 产生较多的含高岭石、绿泥石的风化产物参与沉积; 且在早期主要为洞外较高处的沉积物被携入洞内进行沉积, 在晚期灰岩受到更进一步的风化, 产生更多的风化产物参与沉积, 以及大量的洞壁崩塌的石灰岩角砾和大岩块参与堆积。

阶段 D(2.80~0 m): 该阶段洞内沉积物主要分布于 PC1 的负轴, 且多分布于 PC2 的正轴, 主要分布在伊利石载荷一侧, 因而可认为该阶段主要为洞外较高处的沉积物被携入洞内进行沉积, 且伴有大量的灰岩角砾参与堆积。该阶段也是人类活动的主要层位。温度会对高岭石、绿泥石等产生一定破坏^[78], 为说明这一点我们随机采集了一个表层沉积物样品进行加热 200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃ 处理, 结果(图 9)表明随着温度的增加, 沉积物中黏土矿物会受到不同程度的破坏, 尤其是当温度>400℃ 时, 高岭石、绿泥石会受到明显的破坏。考虑到存在用火痕迹的硝洞, 古人用火可

能会对洞穴沉积物黏土矿物中的高岭石、绿泥石等产生一定的破坏, 因此认为该阶段有人类活动的影响, 不能很好地判断灰岩风化产物参与的情况。

通过对 4 个不同阶段的沉积来源变化的分析发现, 硝洞洞穴沉积物主要来自于洞外较高处的沉积物, 其中在 A、B-2、B-4、C 阶段晚期反映了灰岩的进一步风化, 在 A、B-2、C 阶段晚期、D 阶段存在较多的灰岩角砾或岩块参与堆积, 而在其他阶段较少; D 阶段受到人类活动的影响。

为进一步判别硝洞 ZK2 孔黏土矿物的物源, 本文采用了蒙脱石、伊利石、高岭石+绿泥石三角图(图 10a)及伊利石化学指数-伊利石结晶度判别图(图 10b)。将钻孔沉积物土壤样品的黏土矿物组成与钻孔周围潜在物源区沉积物样品和钻孔岩石样品的黏土矿物组成投点对比, 结果显示钻孔样品的黏土矿物组合基本与较高海拔表层沉积物和浅层堆积的洞穴崩塌掉落的灰岩角砾样品的黏土矿物组合相似, 大都表现为较高伊利石和高岭石+绿泥石含量, 较低蒙脱石含量; 伊利石化学指数和伊利石结晶度判别图中钻孔样品的伊利石与其他样品的基本重叠, 以富 Fe-Mg 的伊利石为主, 伊利石结晶度良好。综上, 从样品间明显的相关性, 可判定硝洞基本表现为高于洞穴的表层沉积物的近源堆积, 且灰岩风化形成的土壤几乎与其同时参与了沉积过程。

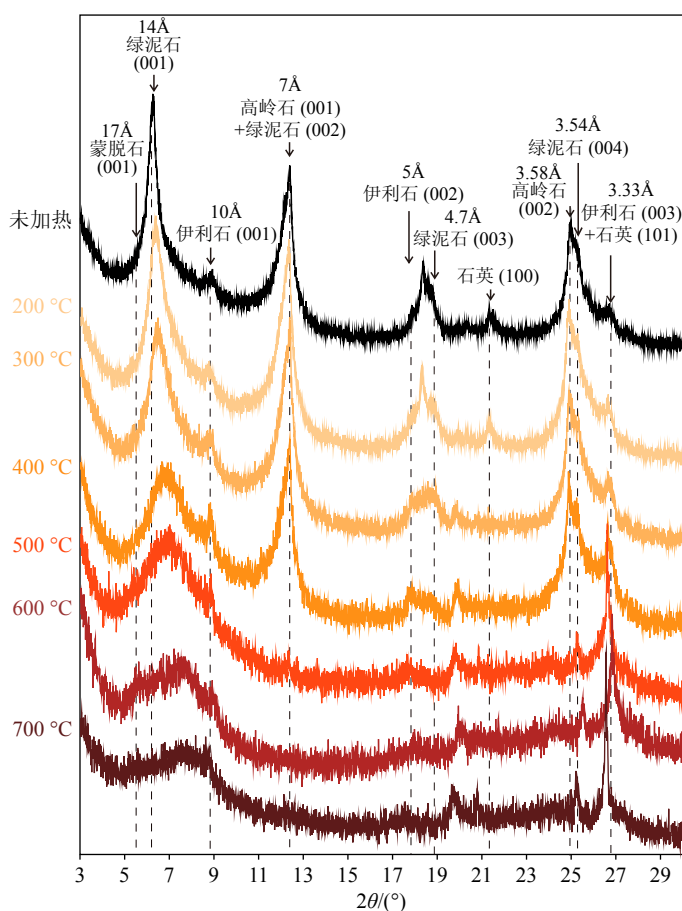


图 9 经不同温度加热处理后沉积物黏土矿物的 X 射线衍射波谱对比图

Fig.9 Comparison in X-ray diffraction spectra of clay minerals in sediments heated at different temperatures

野外观察可知, 硝洞洞前为较多洞顶崩塌灰岩大岩块和第四纪松散沉积物堆积而成的斜坡, 由洞口向洞内延伸, 厚度逐渐递减, 堆积至一定范围后逐渐平缓; 洞内宽而平整, 第四纪松散沉积物广布, 并或多或少存在洞壁崩塌的石灰岩角砾和岩块, 表现为陆相沉积, 以就近物源为主, 分选较差, 堆积厚度较深; 洞口高于附近河流水面约 15 m, 河流沉积物的岩性以细砂为主, 与洞穴沉积物岩性不同, 因而可排除其作为堆积来源的可能性。

硝洞洞穴沉积物的粒度表现为多峰特征, 但主峰明显, 粉砂粒级组分明显占优势, 且堆积物的粒度组成并未发生较为明显的变化, 分布相对集中, 样品分选较差等, 表明其受到了弱水流(片流)作用的搬运, 搬运距离较短。此外, 硝洞灰岩的不溶性物质含量很低, 这为推断各来源在沉积过程中的占比提供了重要参考。

综上, 推断硝洞洞内堆积物的来源有 3 种: 一是洞外较高处的表层沉积物经稳定的弱水流(片流)作用携入洞穴内进行堆积, 为主要的堆积来源; 二是洞穴基岩的风化产物, 以及风化产物在沉积过程

中受气候、风化作用等矿物发生转变后的沉积物堆积, 含量相对较少, 主要经历了 4 次可能的进一步风化; 三是洞壁崩塌的石灰岩角砾和岩块, 总体存在 4 次大量灰岩角砾和岩块参与沉积。此外, 沉积晚期的人类活动对沉积来源变化的判定产生一定影响。

4 结论

(1) 从硝洞洞穴沉积物的粒度组成特征来看, 粉砂为优势粒组, 占总体水平的 80% 以上, 黏粒次之, 砂粒级最少。从粒度参数、频率曲线和 $C-M$ 图来看, 洞穴的沉积环境相对稳定, 具有多种沉积方式形成的混合沉积物特征, 外部沉积动力明显较稳定, 其中主要有水动力搬运的参与, 且水动力条件较低能, 为洞穴堆积物的主要沉积方式。

(2) 硝洞洞穴沉积物的黏土矿物特征与洞穴周边较高海拔处表层沉积物的黏土矿物特征具有明显相似性, 基本都表现为较高伊利石和高岭石+绿泥石含量、较低蒙脱石含量特征, 且伊利石基本都

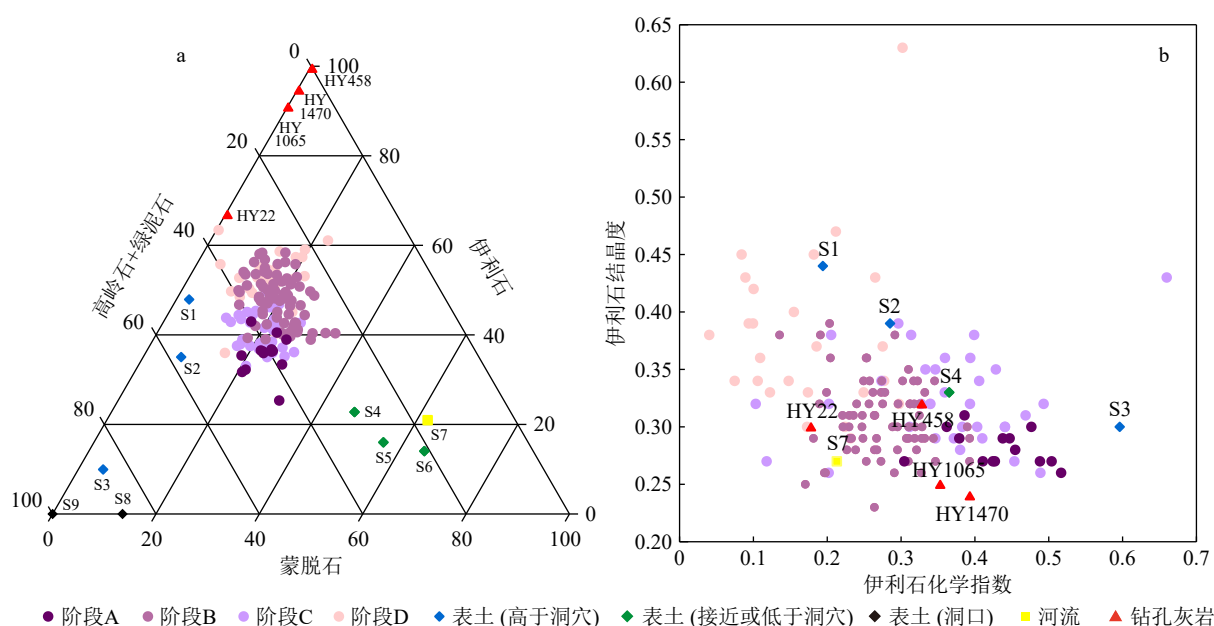


图 10 黏土矿物物源判别图

a: 蒙脱石-伊利石-(高岭石+绿泥石)三角图, b: 伊利石化学指数和伊利石结晶度关系图(其中 S5、S6 样品由于伊利石 002 峰受背景影响较大, 较难准确拟合及 S8、S9 样品由于无伊利石而未在此图中)。

Fig.10 Provenance discrimination of clay minerals

a: Ternary plot of montmorillonite, illite, kaolinite + chlorite, b: diagram of illite chemical index versus illite crystallinity index (Samples S5 and S6 were difficult in accurate fitting due to significant interference from the background of their X-ray diffraction spectra, and Samples S8 and S9 lack illite content; therefore, the four samples are excluded in this plot).

表现为富 Fe-Mg 伊利石, 结晶度良好。基岩不溶性物质的黏土矿物以伊利石为主, 但随着风化时间或强度的增加, 样品中逐渐含有较多的高岭石、绿泥石。周围表层沉积物样品表现为海拔越低, 蒙脱石含量越高, 其他矿物含量减少的趋势。

(3) 溶蚀试验数据分析结果表明, 样品的溶蚀率非常低, 可以推断通过基岩的风化产物形成的物质不可能为洞穴提供如此厚层的沉积物, 因此基岩风化形成的沉积物很大程度上不是洞穴沉积的主要来源。

(4) 根据主成分分析结果及主要 PC 的因子分数沿地层层序的变化可知, 沉积过程中不同沉积来源的占比会发生一定变化, 主要可分为 4 个阶段, 总体表现为以洞外较高处的表层沉积物被携入洞穴内进行堆积为主, 其中在 A、B-2、B-4、C 晚期灰岩可能经历了进一步的风化, 产生含有更多高岭石、绿泥石的风化产物参与堆积, 在 A、B-2、C 晚期、D 阶段存在较多的灰岩角砾或岩块参与堆积, 在 D 阶段人类活动会对物源判定产生一定的影响。

(5) 硝洞洞穴沉积物以洞外较高处的表层沉积物经弱水流(片流)作用被携入洞穴内进行堆积为主, 同时伴有洞穴基岩风化产物和洞壁崩塌的石灰

岩角砾及岩块的堆积。硝洞洞穴沉积物的垂向变化表明其物质来源占比随沉积环境的变化而变化, 因而可结合沉积年代学进一步探讨洞穴堆积物的沉积演化过程及古气候变化。

参考文献 (References)

- [1] 袁道先. 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-2. [YUAN Daoxian. Karstology in China[M]. Beijing: Geology Press, 1994: 1-2.]
- [2] 刘泽纯. 第四纪岩溶洞穴堆积与古人类活动 [J]. 第四纪研究, 1985, 6(1): 60-68. [LIU Zechun. Deposits in Quaternary limestone caves in relation to the life of early man[J]. Quaternary Sciences, 1985, 6(1): 60-68.]
- [3] 曹泽田. 贵州水城硝灰洞旧石器文化遗址 [J]. 古脊椎动物与古人类, 1978, 16(1): 67-72. [CAO Zetian. The Paleolithic cultural site of Xiaohui Cave in Shuiheng, Guizhou province[J]. Vertebrata Palasiatica, 1978, 16(1): 67-72.]
- [4] 任美镛, 刘泽纯, 金瑾乐, 等. 北京周口店洞穴发育及其与古人类生活的关系 [J]. 中国科学, 1981, 11(3): 330-336. [REN Meie, LIU Zechun, JIN Jinle, et al. The relationship between cave development and human subsistence in Zhoukoudian, Beijing[J]. Scientia Sinica, 1981, 11(3): 330-336.]
- [5] 曹泽田. 猫猫洞旧石器之研究 [J]. 古脊椎动物与古人类, 1982, 20(2): 155-164. [CAO Zetian. On the palaeolithic artefacts from

- Mao-Mao-Dong (the rock shelter site), Guizhou Province[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1982, 20(2): 155-164.]
- [6] 李炎贤, 蔡回阳. 贵州普定白岩脚洞旧石器时代遗址 [J]. 人类学学报, 1986, 5(2): 162-171. [LI Yanxian, CAI Huiyang. A Paleolithic site at Puding, Guizhou[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 1986, 5(2): 162-171.]
- [7] 张松林, 刘彦锋. 织机洞旧石器时代遗址发掘报告 [J]. 人类学学报, 2003, 22(1): 1-17. [ZHANG Songlin, LIU Yanfeng. Report on the excavation of Zhijidong Cave site[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2003, 22(1): 1-17.]
- [8] 吉学平, 刘成武, 谭惠忠, 等. 大河洞穴之魅: 富源大河旧石器遗址揭秘 [J]. 中国文化遗产, 2008(6): 78-83. [JI Xueping, LIU Chengwu, TAN Huizhong, et al. The glamour of cave in Dahe: uncovering the Paleolithic sites of Dahe in Fuyuan[J]. *China Cultural Heritage*, 2008(6): 78-83.]
- [9] 武仙竹, 裴树文, 吴秀杰, 等. 湖北郧西白龙洞古人类遗址初步研究 [J]. 人类学学报, 2009, 28(1): 1-15. [WU Xianzhu, PEI Shuwen, WU Xijue, et al. A preliminary study of the Bailong Cave paleoanthropological site in Yunxi county, Hubei province[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2009, 28(1): 1-15.]
- [10] 张美良, 朱晓燕, 覃军干, 等. 桂林甑皮岩洞穴的形成、演化及古人类文化遗址堆积浅议 [J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 305-312. [ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, QIN Jungan, et al. Primary research on the formation and development of Zengpiyan Cave and the ancient cultural layer at the Zengpiyan archaeological site, Guilin, China[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 305-312.]
- [11] 关莹, 蔡回阳, 王晓敏, 等. 贵州毕节老鸦洞遗址 2013 年发掘报告 [J]. 人类学学报, 2015, 34(4): 461-477. [GUAN Ying, CAI Huiyang, WANG Xiaomin, et al. A preliminary report of the Laoya Cave late Paleolithic Site in Bijie, Guizhou Province[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2015, 34(4): 461-477.]
- [12] Ji X P, Curnoe D, Taçon P S C, et al. Cave use and palaeoecology at Maludong (Red Deer Cave), Yunnan, China[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, 8: 277-283.
- [13] Ji X P, Kuman K, Clarke R J, et al. The oldest Hoabinhian technocomplex in Asia (43.5 ka) at Xiaodong rockshelter, Yunnan Province, southwest China[J]. *Quaternary International*, 2016, 400: 166-174.
- [14] 李大伟, 王颖, 胡超涌, 等. 广西陆那洞古人类遗址古环境背景研究 [J]. 第四纪研究, 2017, 37(4): 877-884. [LI Dawei, WANG Wei, HU Chaoyong, et al. Paleoenvironment background research in Luna Cave, Guangxi[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(4): 877-884.]
- [15] Gillieson D. Caves: Processes, Development, Management[M]. Cambridge: Blackwell Publishers, 1996: 59-260.
- [16] Caldeira D, Uagoda R, Nogueira A M, et al. Late Quaternary episodes of clastic sediment deposition in the Tarimba Cave, Central Brazil[J]. *Quaternary International*, 2021, 580: 22-37.
- [17] 陆从伦, 周春林. 南京喀斯特溶洞碎屑充填物的沉积特征和气候地层层学研究 [J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1998, 21(1): 116-119, 124. [LU Conglun, ZHOU Chunlin. Sedimentologies and climatic stratigraphy study on clastic sediment of karst cave in Nanjing[J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science*, 1998, 21(1): 116-119, 124.]
- [18] 张茂恒, 周春林, 尚晓春. 南京汤山猿人洞穴的形成及发展过程 [J]. 江苏地质, 2001, 25(1): 23-26. [ZHANG Maoheng, ZHOU Chunlin, SHANG Xiaochun. The formation and evolving process of Tangshan Ape-man Caves, Nanjing[J]. *Jiangsu Geology*, 2001, 25(1): 23-26.]
- [19] 周春林, 袁林旺, 刘泽纯, 等. 南京汤山葫芦洞地质雷达勘探洞穴堆积研究 [J]. 江苏地质, 2007, 31(1): 25-29. [ZHOU Chunlin, YUAN Linwang, LIU Zechun, et al. Study on ground penetration radar exploration on sediments in Hulu Cave of Tangshan, Nanjing[J]. *Jiangsu Geology*, 2007, 31(1): 25-29.]
- [20] 周春林, 袁林旺, 梁中, 等. 南京汤山葫芦洞碎屑堆积地层对比及地貌演化过程重建 [J]. 地理研究, 2009, 28(2): 321-332. [ZHOU Chunlin, YUAN Linwang, LIANG Zhong, et al. Comparison of cave deposit stratum and reconstruction of landform evolution in Hulu cave of Tangshan, Nanjing[J]. *Geographical Research*, 2009, 28(2): 321-332.]
- [21] Osborne R A L. Sedimentation in karst caves, a review[J]. *Geological Society of Australia N. S. W. Division*, 1986(2): 189-217.
- [22] Ford D, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology[M]. Chichester: Wiley, 2007: 1-562.
- [23] White W B. Cave sediments and paleoclimate[J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2007, 69(1): 76-93.
- [24] 刘泽纯. 第四纪岩溶洞穴堆积层的特点 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1982(1): 163-178. [LIU Zechun. The character of the formation deposited in a limestone cave[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Science*, 1982(1): 163-178.]
- [25] Lynch F L, Mahler B J, Hauwert N N. Provenance of suspended sediment discharged from a karst aquifer determined by clay mineralogy[M]//Sasowsky I D, Mylroie J. *Studies of Cave Sediments*. Boston: Springer, 2004: 83-93.
- [26] Martín-Pérez A, Martín-García R, Alonso-Zarza A M, et al. Features and origin of red clays in Castañar Cave: a touch of colour[M]//Andreo B, Carrasco F, Durán J J, et al. *Advances in Research in Karst Media*. Berlin: Springer, 2010: 515-520.
- [27] Martín-García R, Martín-Pérez A, Alonso-Zarza A M. Weathering of host rock and corrosion over speleothems in Castañar cave, Spain: an example of a complex meteoric environment[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2011, 26(1): 83-94.
- [28] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Bimodal grain-size distribution of Chinese Loess, and its palaeoclimatic implications[J]. *CATENA*, 2004, 55(3): 325-340.
- [29] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 263-277.
- [30] Qiao Y S, Guo Z T, Hao Q Z, et al. Grain-size features of a Miocene Loess-soil sequence at Qinan: implications on its origin[J]. *Science in China Series D*, 2006, 49(7): 731-738.
- [31] Lu H Y, An Z S. Paleoclimatic significance of grain size of Loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 41(6): 626-631.
- [32] 汪海斌, 陈发虎, 张家武. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义 [J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 21-26. [WANG Haibin, CHEN Fahu,

- ZHANG Jiawu. Environmental significance of grain size of Loess-paleosol sequence in western part of Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 21-26.]
- [33] 刘冬雁, 李巍然, 彭莎莎, 等. 粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(2): 79-84. [LIU Dongyan, LI Weiran, PENG Shasha, et al. Current application of grain size analysis in Chinese Loess paleoclimatic study[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(2): 79-84.]
- [34] 敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录: 以沉积物粒度为例[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(6): 563-568. [CHEN Jing'an, WAN Guojiang, ZHANG Feng, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: sediment grain size as an example[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(10): 954-960.]
- [35] 陈敬安, 万国江, 徐经意. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变迁[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 341-345. [CHEN Jing'an, WAN Guojiang, XU Jingyi. Sediment particle sizes and the Dry-Humid transformation of the regional climate in Erhai lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 341-345.]
- [36] 王君波, 朱立平. 藏南沉错沉积物的粒度特征及其古环境意义[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(5): 459-467. [WANG Junbo, ZHU Liping. Grain-size characteristics and their paleo-environmental significance of Chen Co Lake sediments in southern Tibet[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(5): 459-467.]
- [37] 刘兴起, 姚波, 杨波. 青藏高原北部可可西里库赛湖沉积物及风成物的粒度特征[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(6): 1193-1198. [LIU Xingqi, YAO Bo, YANG Bo. Grain size distribution of Aeolian and lacustrine sediments of Kusai lake in the Hoh Xil region of the northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(6): 1193-1198.]
- [38] 肖舜, 陈发虎, 强明瑞, 等. 青海苏干湖表层沉积物粒度分布模式与大气粉尘记录[J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1153-1164. [XIAO Shun, CHEN Fahu, QIANG Mingrui, et al. Distribution pattern of grain size in surface sediments from Sugan Lake and its potential in recording Aeolian dust in Arid China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1153-1164.]
- [39] Qiang M, Lang L, Wang Z. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China)[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1232-1239.
- [40] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 589-596. [YANG Zhuangling, QIAN Guangqiang, DONG Zhibao, et al. Grain size characteristics of the Aeolian sediments from Sanlongsha area of the Northern Kumtagh Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(3): 589-596.]
- [41] 徐树建. 风成沉积物环境敏感粒度指标的提取及意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(3): 95-98. [XU Shujian. Analysis of grain-size populations with environmentally sensitive components in Aeolian deposits and their implications[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(3): 95-98.]
- [42] 强明瑞, 李森, 金明, 等. 60 ka 来腾格里沙漠东南缘风成沉积与沙漠演化[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 256-259. [QIANG Mingrui, LI Sen, JIN Ming, et al. Aeolian deposits on the southeastern margin of Tengger Desert and desert evolution during the last 60 000 Years[J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(3): 256-259.]
- [43] 宋洁, 春喜, 白雪梅, 等. 中国沙漠粒度分析研究综述[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 597-603. [SONG Jie, CHUN Xi, BAI Xuemei, et al. Review of grain size analysis in China Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(3): 597-603.]
- [44] Moreno A, Cacho I, Canals M, et al. Saharan Dust transport and high-latitude glacial climatic variability: the Alboran Sea record[J]. *Quaternary Research*, 2002, 58(3): 318-328.
- [45] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic Eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the Northern Hemisphere[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(3): 215-224.
- [46] Shu G, Collins M. The use of grain size trends in marine sediment dynamics: a review[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19(3): 265-271.
- [47] 王伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(5): 525-531. [WANG Wei, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(5): 525-531.]
- [48] 万世明, 李安春, Stuut J B W, 等. 南海北部 ODP1146 站粒度揭示的近 20Ma 以来东亚季风演化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 761-770. [WAN Shiming, LI Anchun, Stuut J B W, et al. Grain-size records at ODP site 1146 from the Northern South China Sea: implications on the East Asian Monsoon evolution since 20 Ma[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(10): 1536-1547.]
- [49] 杨丛宁, 张戈, 刘思昭, 等. 大连金远洞更新世洞穴红色堆积物粒度特征及沉积环境分析[J]. *地质与资源*, 2018, 27(6): 508-513. [YANG Congning, ZHANG Ge, LIU Sizhao, et al. Analysis on the grain size characteristics and sedimentary environment of the Pleistocene red cave deposits in Jinyuandong, Dalian[J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(6): 508-513.]
- [50] 吴克华, 李坡, 贺卫, 等. 贵州双河洞国家地质公园洞穴冲积物的粒度组成及环境意义: 以山王洞为例[J]. *地球与环境*, 2014, 42(2): 138-144. [WU Kehua, LI Po, HE Wei, et al. Grain size characteristics and environmental significance of the cave alluvium in the Shuanghe Cave National Geopark of Guizhou province: a case study of the Shanwang Cave[J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(2): 138-144.]
- [51] 张育林, 王恒松, 程星, 等. 黔西南喀斯特洞穴沉积物粒度特征分析[J]. *中国水土保持*, 2019(3): 56-59. [ZHANG Yulin, WANG Hengsong, CHENG Xing, et al. Grain size characteristics of karst cave sediments in southwestern Guizhou[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(3): 56-59.]
- [52] Chamley H. *Clay Sedimentology*[M]. Berlin: Springer, 1989: 21-560.
- [53] Thiry M. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: an outlook from the continental origin[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 49(1-4): 201-221.
- [54] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 337-344. [TANG Yanjie, JIA Jianye, XIE Xiande. Environment significance of clay minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 337-344.]

- [55] 蓝先洪, 张训华, 张志珣. 南海沉积物的物质来源及运移研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2005(4): 53-60. [LAN Xianhong, ZHANG Xunhua, ZHANG Zhixun. Material sources and transportation of sediments in the Southern Yellow Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2005(4): 53-60.]
- [56] 彭补拙. 西藏高原洞穴堆积物的粘土矿物组合特征及其古地理意义[J]. *山地研究*, 1992, 10(3): 148-154. [PENG Buzhuo. Characteristics of clay mineral composition in the speleothems on Xizang Plateau and its palaeogeographic meaning[J]. *Mountain Research*, 1992, 10(3): 148-154.]
- [57] 黄胜敏, 李国山, 洪汉烈, 等. 广西中更新世喀斯特洞穴堆积物矿物与元素组成特征及其古气候环境意义[J]. *地理科学*, 2022, 42(12): 2198-2206. [HUANG Shengmin, LI Guoshan, HONG Hanlie, et al. The mineral and elemental characteristics of karst cave deposits of Middle Pleistocene in Guangxi and their paleoclimate and environmental implication[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(12): 2198-2206.]
- [58] 李潇丽, 武仙竹, 裴树文. 湖北郧西白龙洞洞穴发育与古人类生存环境探讨[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(2): 199-208. [LI Xiaoli, WU Xianzhu, PEI Shuwen. Preliminary study on the cave development and environmental background of hominin occupation at Bailong Cave, Yunxi county, Hubei province[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(2): 199-208.]
- [59] Arriolabengoa M, Iriarte E, Aranburu A, et al. Provenance study of endokarst fine sediments through mineralogical and geochemical data (Lezetxiki II cave, northern Iberia)[J]. *Quaternary International*, 2015, 364: 231-243.
- [60] Foos A M, Sasowsky I D, Larock E J, et al. Detrital origin of a sedimentary fill, Lechuguilla cave, Guadalupe mountains, New Mexico[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2000, 48(6): 693-698.
- [61] Wolfe T E. Sedimentation in karst drainage basins along the Allegheny escarpment in southeastern West Virginia, U. S. A. [D]. Doctor Dissertation of McMaster University, 1973.
- [62] 沧源佤族自治县地方志编纂委员会. 沧源佤族自治县志: 1978~2005[M]. 昆明: 云南人民出版社, 2019: 49-82. [Cangyuan Va Autonomous County Local Chronicles Compilation Committee. *Chronicles of Cangyuan Va Autonomous County: 1978~2005*[M]. Kunming: Yunnan People's Publishing House, 2019: 49-82.]
- [63] 李晨阳, 王新春, 何春珍, 等. 全国 1: 200000 数字地质图 (公开版) 空间数据库 (V1)[R]. 北京: 中国地质调查局发展研究中心, 中国地质调查局, 1957. [LI Chenyang, WANG Xinchun, HE Chunzhen, et al. 1: 200, 000 national digital geological map (public version) spatial database (V1)[R]. Development and Research Center, China Geological Survey, 1957.]
- [64] 赵明生. 临沧远古文化述略[J]. *滇西科技师范学院学报*, 2018, 27(3): 1-7, 15. [ZHAO Mingsheng. A summery review of ancient Lincang culture[J]. *Journal of West Yunnan University*, 2018, 27(3): 1-7, 15.]
- [65] McManus J. Grain size determination and interpretation[M]//Tucker M E. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Oxford Blackwell, 1988: 63-85.
- [66] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
- [67] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. *GSA Bulletin*, 1914, 25(1): 655-744.
- [68] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [69] Liu Y M, Liu X X, Sun Y B. QGrain: an open-source and easy-to-use software for the comprehensive analysis of grain size distributions[J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 423: 105980.
- [70] 赵德博, 万世明, 沈兴艳, 等. 海洋沉积物中黏土矿物的两种提取方法的对比[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(5): 173-181. [ZHAO Debo, WAN Shiming, SHEN Xingyan, et al. A discussion on methodology to extract clay minerals from marine sediments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(5): 173-181.]
- [71] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [72] 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, 10(1): 29-38. [LI Jingyang, WANG Chaofu, FAN Tingzhang. Weathering crust of carbonate rocks and process of karst earth formation[J]. *Carsologica Sinica*, 1991, 10(1): 29-38.]
- [73] 李景阳, 朱立军, 王朝富, 等. 碳酸盐岩风化壳及喀斯特成土作用研究[J]. *贵州地质*, 1996, 13(2): 139-145. [LI Jingyang, ZHU Lijun, WANG Chaofu, et al. Weathering crust of carbonate rocks and process of karst soil formation[J]. *Guizhou Geology*, 1996, 13(2): 139-145.]
- [74] 朱立军, 傅平秋, 李景阳. 贵州碳酸盐岩红土中的粘土矿物及其形成机理[J]. *矿物学报*, 1996, 16(3): 290-297. [ZHU Lijun, FU Pingqiu, LI Jingyang. Clay minerals in the laterite developed from carbonate rocks in Guizhou province and their forming mechanism[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1996, 16(3): 290-297.]
- [75] 鲁春霞. 粘土矿物在古环境研究中的指示作用[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 456-460. [LU Chunxia. Clay minerals as indicators of paleoenvironment[J]. *Journal of Desert Research*, 1997, 17(4): 456-460.]
- [76] Hillier S. Erosion, sedimentation and sedimentary origin of clays[M]//Velde B. *Origin and Mineralogy of Clays*. Berlin: Springer, 1995: 162-219.
- [77] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 24-30. [YUAN Daoxian, CAI Guihong. *Karst Environment*[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 24-30.]
- [78] 万世明. 近 2 千万年以来东亚季风演化的南海沉积矿物学记录[D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2006. [WAN Shiming. Evolution of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the South China Sea since 20 Ma[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2006.]