

黄土高原聚淤/淤地坝沉积旋回的冻融过程模拟及理化特征演变^①

赵翔^{1,2}, 王夏青^{2,3*}, 张航瑜^{1,2}, 唐湘玲¹, 周科翰², 黄平安¹

(1 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004; 2 湖南文理学院地理科学与旅游学院, 湖南常德 415000; 3 中国科学院地球环境研究所, 黄土科学全国重点实验室, 西安 710061)

摘要: 基于黄土洼聚淤流域内坡面土模拟沉积旋回的分选成层和冻融循环过程, 通过测量不同冻融状态下各模拟沉积旋回的含水量、颗粒组成、元素组成、有机质和碳酸盐含量等理化特征, 表明本研究模拟的 3 个沉积旋回层理清晰, 具备黄土高原坝库内沉积旋回的典型特征。冷冻后, 模拟的 3 个旋回细颗粒层水分、碳酸盐及 Ca 元素均向上富集, 而热融后, 在下伏的第 1 和第 2 旋回细颗粒层中则向下迁移, 但在顶部第 3 旋回细颗粒层受土水势驱动而逆向移动。研究证实, 沉积旋回细颗粒层中 Ca 和 Fe 高含量和高相关性是鉴别年际冻融层的有效地球化学指标, 而 XRF 连续扫描的 Ca 和 Sr 元素高含量和反相关性可视为辅助指标。

关键词: 年际冻融层; 沉积旋回; 冻融模拟; 聚淤/淤地坝; 黄土高原

中图分类号: P59 文献标志码: A

Simulation of Freeze-thaw Process and Evolution of Physiochemical Characteristics in Deposition Couplets Within Check Dam on Loess Plateau

ZHAO Xiang^{1,2}, WANG Xiaqing^{2,3*}, ZHANG Hangyu^{1,2}, TANG Xiangling¹, ZHOU Kehan², HUANG Ping'an¹

(1 College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2 College of Geography and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde, Hunan 415000, China; 3 State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: The sorting stratification of deposition couplets and freeze-thaw cycling were simulated based on slope soils in the Huangtuwa landslide-dammed reservoir. Meanwhile, physiochemical characteristics (including water content, grain size, element composition, organic and carbonate contents) of each deposition couplet were measured under different freeze-thaw conditions. The results showed that simulated layers of three deposition couplet were distinctly laminated and exhibited typical characteristics of the couplets in landslide-dammed reservoirs and check dams on the Loess Plateau. After freezing, water content, carbonates, and Ca concentration were enriched upward in the fine-grained layers of three simulated couplets. Following thawing, these components migrated downward in the underlying fine-grained layers of the first and second couplets, but they moved upward (in an opposite direction) in the fine-grained layer of the top (third) couplet due to soil-water potential. This study confirms that high concentration and strong positive correlation of calcium (Ca) and iron (Fe) in the fine-grained layer served as effective geochemical indicators for distinguishing annual freeze-thaw layer, whereas the high contents and inverse correlation of Ca and strontium (Sr) by the XRF core scanning was considered as supplementary indicators.

Key words: Annual freeze-thaw layer; Deposition couplet; Freeze-thaw simulation; Landslide-dammed reservoir / Check dam; Loess Plateau

黄土高原沟壑区因地震、暴雨等驱动的滑坡山体拦截沟谷, 形成了众多保存数百年的天然淤地坝, 当地人称之为“聚淤”^[1]。这些聚淤流域因具有保水土、高粮产的功效, 自古以来被当地居民认为是“易于收

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42167062)、湖南省自然科学基金项目(2025JJ50195)、黄土科学全国重点实验室开放基金项目(SKLLQG2313)和地理学应用特色学科资金项目(湘教通[2022]351号)资助。

* 通信作者(wangxq@huas.edu.cn)

作者简介: 赵翔(1999—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为元素地球化学。E-mail: 2133665173@qq.com

获高田”^[2]。通过对聚淤的观察、仿造和拓展,黄土高原自 20 世纪 50 年代起共修建了 5 万余座淤地坝^[3],其中约 85% 集中分布在土壤侵蚀剧烈的中北部丘陵沟壑区和中南部高原沟壑区^[4],被认为是治理水土流失最为有效的措施之一^[5]。在坝体完好无损的前提下,多呈“闷葫芦”状的聚淤和淤地坝将自形成以来的暴雨侵蚀泥沙全部截留在坝库中,单次降水事件侵蚀的泥沙在水体中分选和成层,形成了“上层细、下层粗”二元结构的沉积旋回^[6-7]。故而,沉积旋回与侵蚀性降水呈现“一对一”的关系,沉积序列中的旋回数量及其产沙模数分别指示了同时期的暴雨频率和强度^[8]。此外,聚淤/淤地坝内截留泥沙的物源一致、成层作用明显、淋溶作用较弱、后期生物扰动较小,不同时序的沉积序列均为形态类似、厚度不同的多个沉积旋回的连续堆叠^[9-10]。因此,黄土高原聚淤/淤地坝沉积序列被广泛用以重建不同地貌区年际尺度的土壤侵蚀过程和固碳效应^[11-12]、侵蚀历史及驱动因素^[1,13]、小流域人地关系演变及区域差异等^[14]。例如,Wei 等^[13]基于淤地坝沉积序列重建了黄土高原延河中游地区 1975—2013 年间的土壤侵蚀历史及驱动因素,指出人类活动是该流域丘陵沟壑区侵蚀减弱的主要因素。

聚淤/淤地坝沉积序列的精确断代是广泛开展上述类似研究的核心和前提^[9]。常用的定年方法为:在利用 ¹³⁷Cs 比活度分布识别 1963 年以后首次暴雨形成的沉积旋回后,基于“大雨对大沙”原则将实测暴雨与旋回产沙模数一一对应,进而建立近 60 年来沉积序列的年代框架^[13,15-16]。但是,直接利用沉积岩芯年际关键层进行沉积旋回年际划分的研究却较为少见,制约了常规方法的可靠性判别和 20 世纪 60 年代以前的长时序沉积序列的断代^[9,17]。年际冻融层是聚淤/淤地坝流域一年周期内最后一次暴雨侵蚀泥沙形成的、经历当年冬季霜冻和次年春季融化作用的细颗粒层,是沉积序列年际划分的关键层^[18]。Zhang 等^[9]指出淤地坝沉积序列中呈“冻豆腐状”的旋回细颗粒层为冬春季节冻融作用改变土壤结构的结果,可作为识别年际冻融层的形态学指标。Wang 等^[18]进一步分析了沉积序列中年际冻融层的形成过程,指出旋回细颗粒层中 Ca 和 Fe 的高含量和高相关性可用作识别年际冻融层的地球化学指标。然而,上述指标的提出均依据沉积岩芯中已有的年际冻融层分析而得,其判别存在较大的经验性和主观性,未能从年际冻融层的形成过程中识别其演变机理和有效指标,限制了基于年际冻融层定年沉积序列的广泛应用。

因此,本研究基于黄土洼聚淤流域内收集的坡面土,通过在实验室内模拟土壤在水体中的分选和成层过程,首先生成了 3 个连续堆叠的沉积旋回,随后对其开展单次冷冻、单次热融、多次冻融循环模拟,并及时测量了不同模拟状态各沉积旋回含水量、颗粒组成、有机质和碳酸盐含量、元素组成等理化特征。并在此基础上,详细分析了冻融过程中土壤水分、碳酸盐及活泼元素的变化趋势及差异,以明确冻融作用下年际关键层的形成机理,进而提出更具普适性的可靠指标,为黄土高原不同时序聚淤/淤地坝沉积序列的精准断代提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验土壤来源

本次模拟试验的土壤采集于陕西省榆林市子洲县裴家湾镇黄土洼聚淤内(37°19'N, 110°1'E)。据《清涧县志》记载,黄土洼聚淤是明隆庆 3 年(公元 1569 年)流域左岸九牛山山体滑坡拦截沟谷而成^[8-9]。目前,该聚淤是黄土高原现存时间序列最长、面积最大的全冲全淤型天然淤地坝^[19],故有“淤地坝鼻祖”的美誉。黄土洼聚淤流域属温带大陆性季风气候边缘区,四季差异明显,年均气温为 9.7 °C,1 月和 7 月的平均气温分别为 -7.6 °C 和 24.2 °C,平均无霜期约为 145 d,最大冻土深度达 115 cm,冻融作用强烈;流域年平均降水量为 486 mm,其中 65% 集中在 7—9 月且多以暴雨发生,年均土壤侵蚀模数为 8 116.1 t/km²,极强烈的侵蚀区域主要集中在坝地边缘^[20]。因此,考虑到黄土洼聚淤内淤积泥沙来源一致^[10]、树枝状的沟谷地貌结构^[9]、极强烈侵蚀区的空间分布^[20]、坡面土和淤积土的组成差异^[7]等因素,选取坝库内支沟汇集处的边缘坡面上未经耕种和扰动的天然坡面土作为研究对象,于 2022 年 11 月采集 0~10 cm 土壤共约 90 kg 用于试验。

1.2 旋回分选和成层

室内模拟沉积旋回的生成全面参照淤地坝沉积旋回在自然环境中的形成过程^[6]。在实验室内将所采集的黄土洼淤地坝坡面土样自然风干并过 2 mm 筛以剔除植物根系,同时准备长、宽、高分别为 35、25、70 cm 的长方体亚克力箱作为土壤分选和成层的容器,以水体中 10 cm 的单个旋回厚度连续堆叠 3 个旋回,沉积过程如图 1 所示。试验具体流程为:①风干过筛后的黄土和清水以一定比例混合,在搅拌均匀后静置 48 h 并抽掉上部清液,进而形成粗、细颗粒分层明显的第 1 旋回(图 1A);②在尽可能不扰动

第1旋回的基础上,重复上述步骤生成上覆的第2旋回(图1B);③在不扰动第1、2旋回的基础上,继续重复上述步骤生成所需的第3旋回(图1C),从而

得到在水体中连续堆叠的30 cm厚黄土沉积序列,最后抽取上清液,在自然环境中晾晒直至序列表面无明显水迹。

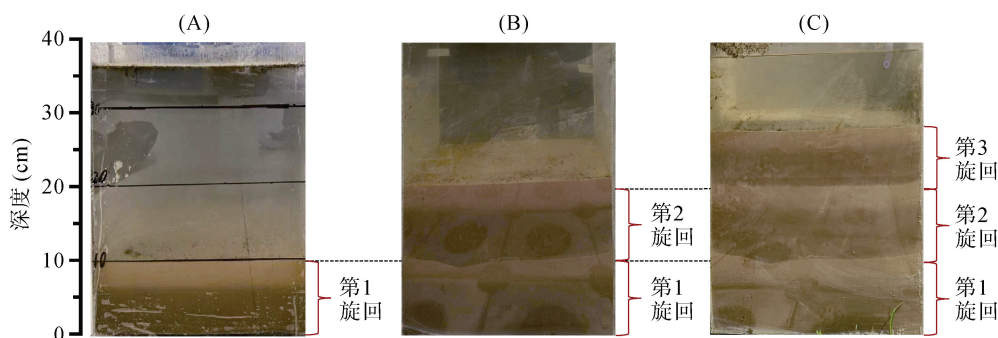


图1 黄土沉积旋回模拟过程流程图

Fig. 1 Flow charts of simulation processes of loess deposition couplet

1.3 冻融循环过程模拟

在沉积序列表层晾干后,利用长1 m、直径9 cm的4根岩芯管同步垂直插入,确保各岩芯管未相互干扰,而且4根平行岩芯可重复比较。随后,切开亚克力箱并清除多余泥沙,仔细取出4根平行岩芯用以冻融过程中不同状态下的模拟(图2A),其中1根用作未经冻融的常规样。为了与自然环境中淤地坝沉积旋回由上至下的冻融过程一致^[18],在开展冷冻、热融、多次冻融的3根沉积柱的底部及四周包装隔温材料,确保其中的样品由上至下冻融(图2B)。随后,利用HSY-80D 高低温交变湿热箱模拟土柱的冻融循环过程。试验具体流程为:①包装了隔温材料的3根沉积柱在-25℃恒温条件下冷冻48 h,随后取出1根快速分样并放入冷藏柜中保存,用以分析单次冷冻状态下的旋回特征;②剩余2根沉积柱在20℃恒温条件下融化48 h,随后取出1根用以分析单次热融状态下的特征;③待仪器闲置48 h后,将最后1根沉积柱在上述条件中重复循环两次,用以分析经历多次冻融后的旋回特征。

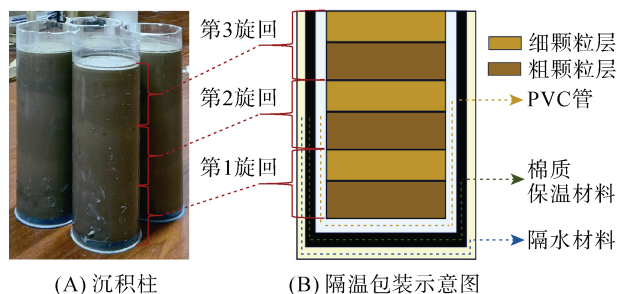


图2 用以冻融模拟的沉积柱及隔温包装示意图

Fig. 2 Deposition columns for freeze-thaw simulation and insulated packaging diagram

1.4 理化组成测定

取得不同冻融状态的沉积柱后,利用切割机和细钢丝沿长轴对其进行剖样,并利用硬塑料板平整沉积柱岩芯表面,一半用于XRF(X射线荧光光谱)岩芯连续扫描,另一半先划分3个可见沉积旋回,随后在各个旋回内以0.5 cm间隔分样,共获得181个样品。不同状态的沉积柱在覆盖4 μm Ultralene薄膜后,在兰州大学西部环境教育部重点实验室先利用Avaatech XRF core scanner仪器绑定的3×2048 pixels照相机生成0.07 mm扫描间隔的RGB和CIE-L*-a*-b*两种类型色度数据^[21],随后以下列具体设置开展XRF岩芯连续扫描:①利用锆(Ni)管在10 kV电压下获取原子量≤26的元素(如Al、Si、K、Ca和Fe)信号值,扫描间隔为2 mm,曝光时间为15 s;②利用铅(Pb)管在30 kV电压下获取原子量>26的元素(如Zr、Rb和Sr)信号值,扫描间隔也为2 mm,曝光时间为25 s。扫描的元素信号值提供了沉积序列元素组成的半定量信息^[21],其单位为cps(counts per second)。

所有样品在烘箱中105℃条件下烘干48 h,基于烘干前后质量差计算各样品的含水量(以质量分数计)。随后,将烘干样品过20目筛去除植物残体和大颗粒杂质,称取0.5 g过筛样并添加浓度为10%的双氧水和稀盐酸(HCl),分别去除土壤中的有机质和碳酸盐,加入10 mL浓度为1 mol/L的六偏磷酸钠分散剂后静置48 h,利用英国马尔文公司生产的Mastersizer 2000激光粒度仪测定各样品的粒度组成(以体积分数计),测试误差小于2%^[22]。样品的有机质和碳酸盐含量分别利用550℃和950℃烧失量结果测定^[23],具体过程为:利用高精度天平(精度为0.000 1 g)

称取 1 g 研磨样品盛入坩埚中并放置到马弗炉中, 根据国际通用实验流程^[23]在 550℃ 和 950℃ 恒定温度下分别煅烧 4 h 和 2 h 后, 称量和计算各温度下损失的土壤质量, 并依次计算其占原样质量的比重。另外, 称取 5 g 烘干土样并研磨至 200 目, 将样品压片后利用日本 ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪定量分析样品常量、微量元素的实际含量。

1.5 数据处理与分析

所有实验数据利用 Origin 2021 软件统计与分析。模拟的 3 个旋回物理特征变化利用 Origin 2021 软件中点线图对比分析, 随后通过箱线图示意各旋回上部细颗粒层含水量和碳酸盐在常规、冷冻、热融、多次冻融状态下的变化趋势, 并基于面积图识别 XRF 扫描的各元素在不同状态下的分布和变化。最后, 不同状态下各元素的相关性分析和 95% 置信区间下的 t 检验通过 Origin 2021 软件中的线性拟合完成。

2 结果与分析

2.1 沉积柱的亮度、颗粒组成和有机质含量分布

为了精准识别沉积柱中 3 个可见旋回的层理分

布, 分析了常规状况下沉积柱的亮度(L^*)、颗粒组成和有机质含量, 其结果如图 3 所示。整根沉积柱的 L^* 变化范围为 56.48 ~ 70.42 cd/m^2 , 除 2.5 cm 处沉积裂隙处极低的 L^* 值外, 所有可见旋回的 L^* 分布均表现出下层亮、上层暗的特征。沉积柱的颗粒组成以粉砂为主(平均约 67%), 砂粒含量次之(平均约 29%), 黏粒含量最少(平均约 4%)。3 个旋回的颗粒组成基本一致, 但不同层理间的差异明显。各旋回的下层主要由粗粉砂和砂粒组成, 平均含量高达 67.49%; 而上层则以黏粒和细粉砂为主, 平均含量为 51.92%。此外, 沉积柱的有机质含量为 1.41% ~ 6.64%, 总体表现出旋回上层含量高、下层含量低的特点。总之, 沉积柱中 3 个旋回的上部层理 L^* 低、颗粒细、有机质含量高, 而下部层理则相反, 与野外地理环境中的旋回特征一致^[6]。根据上述指标分布, 沉积柱中由下至上的第 1 旋回深度范围为 0.0 ~ 8.0 cm, 5.8 ~ 8.0 cm 间属细颗粒层; 第 2 旋回的范围为 8.0 ~ 14.0 cm, 12.5 ~ 14.0 cm 间属细颗粒层; 第 3 旋回的范围为 14.0 ~ 23.3 cm, 18.4 ~ 23.3 cm 间属细颗粒层(图 3)。

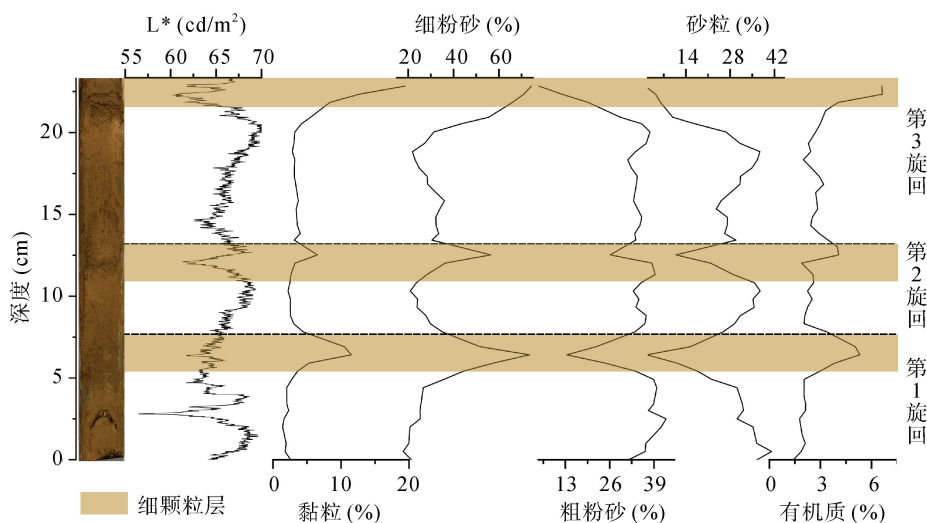


图 3 沉积柱的亮度(L^*)、颗粒组成和有机质含量分布

Fig. 3 Distributions of L^* , particle composition and organic content along loess deposition columns

2.2 不同冻融状态的旋回细颗粒层含水量和碳酸盐含量

考虑到沉积旋回中的土壤水分和碳酸盐主要富集在上部细颗粒层^[6], 对模拟沉积柱中 3 个旋回细颗粒层不同冻融状态下的含水量和碳酸盐含量进行了分析。常规状态下, 3 个旋回细颗粒层的平均含水量变化范围为 14.37% ~ 24.09%, 最顶部的第 3 旋回细颗粒层含量最高, 而中间的第 2 旋回则最低(图

4A)。在冷冻状态下, 3 个旋回细颗粒层的平均含水量变化均一致升高, 而在热融状态下则同步降低, 但不同旋回的变化幅度并不一致。相较于常规状态, 第 3、第 2、第 1 旋回细颗粒层的平均含水量在冷冻状态下分别提高至 19.38%、19.33%、21.29%, 而在热融状态下则分别降低至 15.86%、18.57%、19.70%。在经历多次冻融循环后, 3 个旋回细颗粒层的平均含水量基本相同, 由下而上分别是 18.06%、18.11%、

18.06%, 但顶部第3旋回细颗粒层呈上升趋势, 而其他2个旋回呈下降趋势。3个旋回细颗粒层的碳酸盐平均含量在常规状态下的变化范围为4.30%~9.93%, 与含水量分布趋势一致(图4B)。然而, 顶部第3旋回细颗粒层的碳酸盐平均含量在冷冻状态和热融状态下均呈现先下降后上升的过程, 而第2和第1旋回细颗粒层则均呈先上升后下降的变化趋势, 与含水量变化相似。此外, 在冷冻状态下, 第

2和第1旋回细颗粒层的碳酸盐平均含量较高, 分别为6.70%和6.84%, 第3旋回最低为5.75%; 而在热融状态下则相反, 第3旋回细颗粒层碳酸盐平均含量快速上升为最高, 达6.66%, 第2和第1旋回则分别下降至6.03%和6.13%。在多次冻融循环后, 顶部第3旋回细颗粒层的碳酸盐平均含量升至8.58%, 第2旋回次之, 第1旋回最低为5.88%, 3层间的差异更加显著。

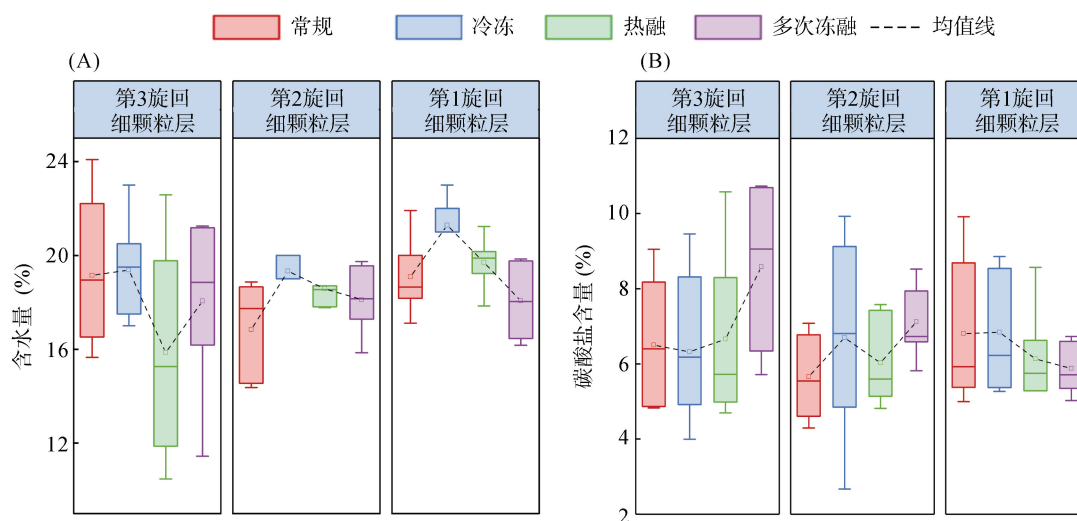


图4 3个旋回细颗粒层在不同冻融状态下的含水量和碳酸盐含量分布

Fig. 4 Distributions of moisture and carbonate contents in fine-grained layers of three deposition couplets under different freeze-thaw states

2.3 沉积柱的 XRF 扫描信号值与元素含量分布

根据沉积旋回在分选和成层作用后的稳定元素分布特征^[6,10], 为了识别冻融过程中活泼元素的迁移过程^[18], 本文着重分析稳定富集在粗颗粒层中 Zr 元素和细颗粒层中的 Fe 和 Rb 元素, 以及随土壤孔隙水移动的活泼元素 Ca 和 Sr。基于 XRF 岩芯连续扫描的元素信号值分布, Zr、Fe、Rb、Ca 和 Sr 元素信号值在常规状态下的变化范围分别为 $16.84 \times 10^2 \sim 91.21 \times 10^2$ 、 $4.38 \times 10^4 \sim 9.83 \times 10^4$ 、 $9.06 \times 10^2 \sim 19.25 \times 10^2$ 、 $6.05 \times 10^4 \sim 16.02 \times 10^4$ 、 $31.45 \times 10^2 \sim 60.45 \times 10^2$ cps (图 5)。其中, Zr 元素在 3 个旋回中均呈现出粗颗粒层高、细颗粒层低的特点, 与前期研究一致^[6], 而其他 4 个元素在旋回层理间的分异不甚明显。在经历冷冻后, 所有元素信号值在第 1 和第 3 旋回细颗粒层呈现出明显的升高趋势, 而在热融后第 2 旋回细颗粒层的元素信号则显著增强。多次冻融后, 元素信号最显著的变化出现在沉积柱底层的第 1 旋回, 特别是富集在细颗粒层中的 Fe、Rb、Ca 和 Sr 元素。此外, 通过仔细观察各元素在不同旋回细颗粒层的变化趋势, 发现冷冻状态和热融状态下所有元素在沉积柱中下部的第 2 和第 1 旋回细颗粒层的趋势一致, 但在顶部

的第 3 旋回则呈现差异。相较于热融状态下 Fe、Rb 和 Sr 元素在第 3 旋回细颗粒层呈向下富集趋势, Ca 元素则表现出明显的向上增高的结果, 与其他元素相反(图 5)。

模拟沉积柱中 3 个旋回细颗粒层的 Zr、Fe、Rb、Ca、Sr 元素的实际含量在常规状态下的分布范围分别为 0.02%~0.06%、4.75%~8.12%、0.01%~0.02%、9.32%~16.93% 和 0.04%~0.06%(表 1)。各个旋回细颗粒层的 Zr 元素含量变化均呈现在冷冻状态下先降低和在热融状态下再升高的趋势, 而 Fe、Rb、Ca、Sr 元素的含量则呈现在冷冻状态下先升高而在热融状态下再降低的过程, 与不同热融状态下各旋回细颗粒层含水量的变化趋势一致(图 4A)。需指出的是, 第 1 旋回细颗粒层 Fe、Rb、Ca、Sr 元素在冷冻状态下富集, 在热融状态下低于常规状态, 而第 2 旋回细颗粒层的元素含量则在热融状态下高于常规状态。第 3 旋回细颗粒层的 Fe、Rb、Sr 元素在热融状态下的含量也低于常规状态, 但 Ca 元素的含量则略高于常规状态。各旋回细颗粒层的上述元素实际含量变化与 XRF 连续扫描的元素信号变化趋势一致(图 5)。多次冻融循环后, 3 个旋回细颗粒层 Zr 元素含量由下而上逐步降

低, 而 Fe、Rb、Ca、Sr 元素含量则呈升高趋势。但是, 第 1 旋回和第 2 旋回细颗粒层 Fe、Rb、Ca、Sr 元素含量在多次冻融后比单次冻融后更低, 仅顶部第 3 旋回细颗粒层中各元素含量得到了提升(表 1)。

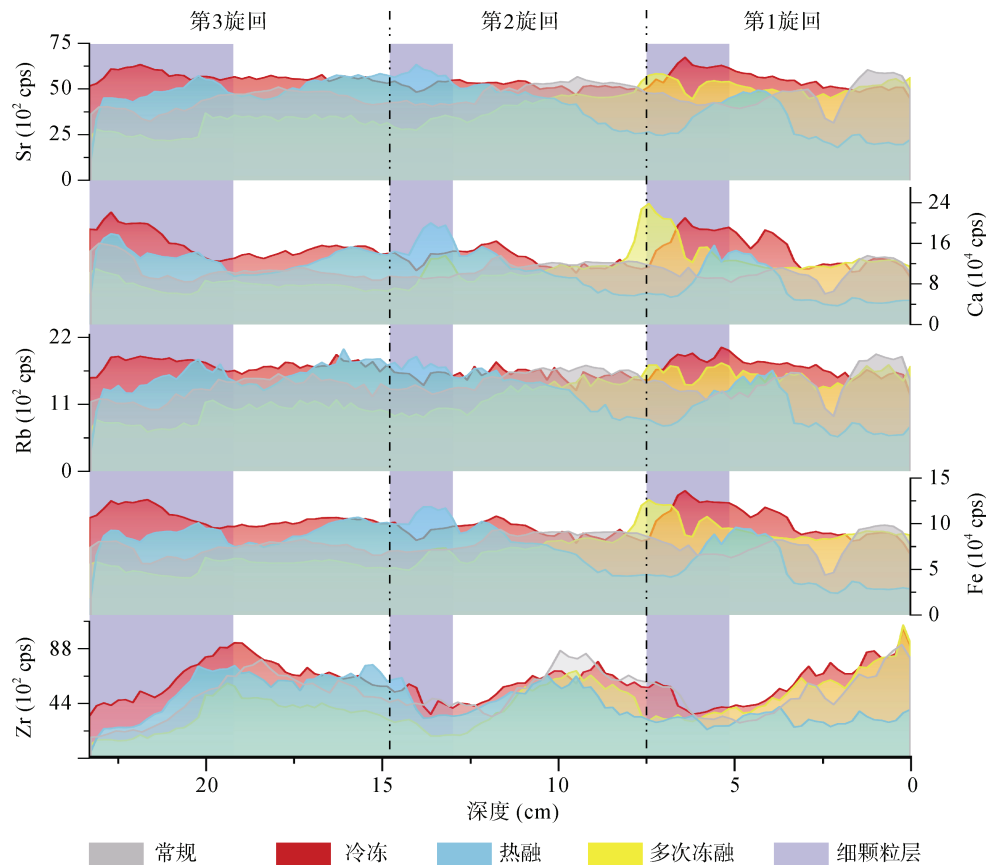


图 5 不同冻融状态下 XRF 连续扫描的沉积柱元素信号值分布面积图

Fig. 5 Distribution areas of element signal values along deposition columns by XRF core scanning under different freeze-thaw conditions

表 1 不同冻融状态下 3 个旋回细颗粒层的元素含量

Table 1 Elements contents in fine-grained layers of three deposition couplets under different freeze-thaw conditions

细颗粒层	状态	Zr (10^{-2} %)		Fe (%)		Rb (10^{-2} %)		Ca (%)		Sr (10^{-2} %)	
		变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
第 3 旋回 细颗粒层	多次冻融	1.46 ~ 3.20	2.36	5.02 ~ 7.69	6.42	1.33 ~ 1.76	1.57	10.14 ~ 16.54	13.35	4.02 ~ 5.58	4.89
	热融	1.56 ~ 4.80	3.07	4.80 ~ 7.62	5.82	1.24 ~ 1.75	1.43	9.47 ~ 16.50	12.25	3.88 ~ 5.58	4.50
	冷冻	1.77 ~ 4.27	2.69	4.70 ~ 7.85	6.11	1.28 ~ 1.72	1.48	9.47 ~ 17.14	12.69	3.83 ~ 5.74	4.67
	常规	1.76 ~ 5.59	3.13	4.85 ~ 8.12	5.98	1.37 ~ 1.65	1.52	9.73 ~ 16.93	12.14	3.91 ~ 6.06	4.64
第 2 旋回 细颗粒层	多次冻融	2.55 ~ 4.11	2.89	4.92 ~ 7.05	5.77	1.25 ~ 1.54	1.42	10.16 ~ 15.43	12.05	3.95 ~ 5.15	4.42
	热融	2.47 ~ 3.93	2.83	4.78 ~ 7.24	5.90	1.26 ~ 1.72	1.48	9.49 ~ 15.66	12.08	3.88 ~ 5.09	4.51
	冷冻	1.76 ~ 3.80	2.58	5.36 ~ 7.63	6.38	1.38 ~ 1.69	1.50	10.70 ~ 16.57	13.40	4.09 ~ 5.42	4.70
	常规	2.78 ~ 5.49	3.95	4.75 ~ 5.78	5.12	1.25 ~ 1.48	1.25	9.32 ~ 11.64	10.16	3.97 ~ 4.77	4.16
第 1 旋回 细颗粒层	多次冻融	2.56 ~ 5.45	4.44	4.87 ~ 5.51	5.11	1.22 ~ 1.47	1.30	9.91 ~ 10.93	10.25	3.91 ~ 4.33	4.12
	热融	1.47 ~ 3.83	2.42	4.86 ~ 7.19	5.87	1.32 ~ 1.54	1.44	9.78 ~ 15.11	11.95	4.12 ~ 5.10	4.54
	冷冻	1.81 ~ 2.77	2.27	5.16 ~ 6.95	6.15	1.43 ~ 1.62	1.52	10.30 ~ 14.67	13.00	4.14 ~ 5.14	4.68
	常规	1.84 ~ 3.03	2.51	4.67 ~ 7.10	5.96	1.27 ~ 1.71	1.52	9.62 ~ 15.60	12.38	3.91 ~ 5.14	4.58

3 讨论

3.1 冻融过程中沉积旋回的理化特征变化

黄土高原广泛建设的淤地坝截留的泥沙通过水

体中的分选和成层过程, 表现为下部粗颗粒层和上部细颗粒层的二元结构沉积旋回^[7-8]。本研究中, 模拟的沉积柱中 3 个沉积旋回层理清晰, 下部粗颗粒层的粗粉砂和砂粒含量高达 67.49%; 而黏粒和细粉砂平

均含量为 29.56%, L^* 较高而有机质平均含量仅为 2.32%(图 3), 常规状态下的 Zr 元素扫描信号值较高, 其分布范围为 $28.52 \times 10^2 \sim 91.21 \times 10^2$ cps(图 5)。相较而言, 上部细颗粒层的黏粒和细粉砂含量高达 51.92%, 而粗粉砂和砂粒含量仅为 46.82%, L^* 较低而有机质平均含量则高至 3.79%(图 3), 常规状态下的 Zr 元素扫描信号值较低, 其分布范围仅为 $16.84 \times 10^2 \sim 66.63 \times 10^2$ cps(图 5)。上述理化特征表明, 本研究模拟的 3 个旋回具备自然环境下黄土高原淤地坝沉积旋回的典型特征^[6], 为开展冻融循环模拟奠定了良好的地质载体。需指出的是, 在模拟的 3 个旋回细颗粒层中, Fe、Rb、Ca、Sr 等元素在常规状态下的分布并未呈现出明显的富集状态, 与野外实际存在的旋回元素特征并不完全一致(图 5), 这可能是因为模拟过程中土壤(特别是较轻的细颗粒物)在水体中的分选时间较短而成层不够充分, 或是源于单一土地利用方式的试验土壤不能充分代表整个流域侵蚀土壤元素变化, 今后需基于野外连续监测进一步验证模拟结果。

本研究中, 沉积柱中常规状态下的 3 个沉积旋回根据黄土高原北部实际气候特征进行了冷冻、热融和多次冻融的过程模拟。①冷冻状态下, 3 个旋回细颗粒层的含水量均升高至整个冻融过程中的最高值, 最底部的第 1 旋回细颗粒层增长幅度最大, 而顶部的第 3 旋回则最小(图 4), 这可能是冷冻模拟过程结束后顶部细颗粒层融化并水分蒸发的结果^[24]。第 1 旋回和第 2 旋回细颗粒层中的碳酸盐含量随着水分迁移也呈明显的提高, 而顶部第 3 旋回的碳酸盐含量则因水分上升幅度不大而变化较小(图 4)。与此同时, XRF 扫描的 Fe、Rb、Ca、Sr 元素信号值和实际含量分布均表明, 冷冻显著影响了 3 个旋回细颗粒层的元素组成(图 5 和表 1)。相较于常规状态, 3 个旋回细颗粒层中各元素的实际含量均在冷冻后达到了整个冻融过程的最高值, 而 XRF 扫描的各元素信号值则在第 1 和第 3 旋回细颗粒层中达到最大值, 但在第 2 旋回则变化不明显, 这可能是第 2 旋回细颗粒层较薄而未能起到“隔水层”的效果^[25], 各元素在冷冻状态下向上覆的第 3 旋回粗颗粒层迁移的结果(图 5)。②热融状态下, 3 个旋回细颗粒层的含水量相较于冷冻状态下均有所回落, 但第 1 和第 2 旋回细颗粒层含水量仍高于常规状态, 而顶部的第 3 旋回细颗粒层含水量则比常规状态更低(图 4), 这表明第 3 旋回水分除与下伏的第 1 和第 2 旋回细颗粒层水分向下同步移动外, 部分水分在热融过程中被蒸发。同时, 第 1 和第

2 旋回细颗粒层因水分向下移动导致其碳酸盐含量也同步降低, 而暴露于大气中的第 3 旋回细颗粒层受蒸发过程中土水势的驱动使得碳酸盐向表层富集^[26-28], 导致该层更高的碳酸盐含量(图 4)。对于 Fe、Rb、Ca 和 Sr 这 4 个元素, 第 1 和第 3 旋回细颗粒层中 XRF 扫描的信号值相较于冷冻状态下明显降低, 而中间的第 2 旋回则有所升高(图 5)。但第 2 旋回细颗粒层中各元素的实际含量略低于冷冻状态, 而比常规状态高, 第 1 和第 3 旋回细颗粒层则比常规状态低(表 1)。因此, 第 2 旋回细颗粒层各元素扫描信号值升高是其实际含量增高的结果, 而实际含量增高是源于热融状态下上覆第 3 旋回粗颗粒层各元素的向下富集。③多次冻融后, 第 1 和第 2 旋回细颗粒层的含水量仍持续下降, 底部的第 1 旋回比常规状态更低, 而顶部第 3 旋回细颗粒层的含水量则显著升高, 说明多次冻融下更大的土水势将沉积柱中下部的水分带到了顶部^[26]。3 个旋回细颗粒层碳酸盐的含量变化与含水量变化基本一致(图 4)。此外, 各元素的 XRF 扫描信号值变化表明, 多次冻融明显驱动第 1 旋回的元素向上迁移(图 5), 而元素在 3 个旋回细颗粒层中的实际含量则反映出与含水量和碳酸盐一致的变化(图 5), 即在土水势的反复作用下促使底部元素向顶部富集^[26,29]。

3.2 年际冻融层的地球化学示踪

作为黄土高原聚淤/淤地坝沉积旋回年际划分的关键层, 年际冻融层的精准鉴别是坝库内泥沙沉积序列断代、历史时期土壤侵蚀量和人地关系重建的关键性因素。相关学者从形态学、地球化学等视角提出了年际冻融层的鉴别方法, 例如“冻豆腐状”^[9]、“Ca 和 Fe 的高含量和高相关性”^[18]等。然而, 在本研究模拟的冻融过程中未能观察到类似于野外实际地理环境中顶部细颗粒层的风干、冻裂等现象和“冻豆腐状”的形态学变化, 可能是下列因素共同作用的结果。①沉积序列顶部细颗粒层的含水量较低, 冷冻状态下土壤内的水分结晶和冰楔体积不大^[9], 而且沉积柱岩芯管的直径较小, 土壤热胀冷缩受管内空间限制而导致裂隙等不够明显; ②冻融箱封闭, 冻融时间短, 使得水分相态变化不突出^[26]。考虑到本次模拟过程详细监测了 3 个旋回堆叠的沉积柱在常规状态、冷冻状态、热融状态及多次冻融状态下的土壤水分、碳酸盐及元素的变化过程, 对年际冻融层的元素组成变化和地球化学示踪进行了进一步分析和讨论。

上述冻融循环过程中沉积柱各旋回细颗粒层的理化特征变化表明, 多次冻融循环进一步促使了底部元素的向上迁移并在表层富集, 更易基于元素组成鉴

别年际冻融层。然而,年内最后一次暴雨侵蚀的沉积旋回细颗粒层是否经历多次冻融循环,取决于坝库规模、次年侵蚀性降水的强度和频率、侵蚀泥沙厚度等^[16]。例如,坝库淤积面积较小的皇甫川满红沟淤地坝在 20 mm 降水量的侵蚀下即会淤积泥沙并形成沉积旋回^[13],该年度侵蚀的泥沙和经历冻融的细颗粒层很快被次年的泥沙覆盖。而淤积面积较大的黄土洼聚淤在 60 mm 的暴雨侵蚀才会形成沉积旋回^[30],该年的冻融层直至其他年份的同强度暴雨发生才会被侵蚀泥沙覆盖,冻融循环的次数取决于暴雨发生的频率。因此,本次模拟过程中选择 3 次冻融循环代表多次循环的地球化学变化结果。为了广泛识别黄土高原不同地貌区规模各异的聚淤/淤地坝沉积序列的年际冻融层,本文着重对比分析沉积柱内 3 个旋回细颗粒层常规状态和单次热融状态的元素组成,以进一步提出更具广适性和普遍性的地球化学指标。

本研究中,XRF 连续扫描的 3 个旋回元素信号值变化和其细颗粒层实际含量均表明,单次冻融循环后热融状态下 Ca 元素在沉积柱顶部第 3 旋回细颗粒层发生了显著的富集,特别是 XRF 扫描显示出 Ca 元素信号呈明显升高的现象,与 Fe、Rb、Sr 相反(图 5 和表 1)。因此,Ca 元素在冻融循环下的进一步富集被视为识别年际冻融层的最直观地球化学特征^[18]。需指出的是,各元素在不同状态下的实际含量变化不如 XRF 扫描的元素信号值差异显著,可能是模拟试验的温度选择和各状态持续时间不长的结果,今后需进一步野外连续监测和验证元素在不同状态下的分异程度和显著性差异。在此基础上,本研究首先验证了基于“Ca 和 Fe 的高含量和高相关性”^[18]的年际冻融层地球化学鉴定指标。为了消除 XRF 扫描过程中仪器设置和岩芯物理属性的共同影响^[31],选取影响程度较小的 Zr 元素对 Ca 和 Fe 元素信号值进行校正^[21]。XRF 连续扫描的 3 个旋回细颗粒层在常规状态和热融状态下的 Ca/Zr 和 Fe/Zr 信号比值相关性分布如图 6A 所示,而 Ca 和 Fe 元素实际含量的相关性分布则如图 6B 所示。结果表明,相较于下伏的第 1 和第 2 旋回,顶部第 3 旋回细颗粒层在热融状态下呈现以下特征:①不论是 XRF 扫描的 Ca 元素信号值还是其实际含量均表现为最高值,且与 Fe 相关性斜率也表现为最高(斜率 S 分别为 2.54 和 2.42);②比常规状态有更大幅度的提升。因此,本次冻融过程模拟的不同状态下 Ca 与 Fe 相关性变化进一步从形成过程验证了之前提出的鉴定年际冻融层的地球化学指标^[18]。

然而,细颗粒层中富集的稳定元素 Fe 在冻融过

程中迁移程度不大^[18],活泼元素 Ca 可能在不同冻融强度下均可迁移且与 Fe 元素高相关性,故基于该指标鉴别年际冻融层需依靠一定的经验性。为此,同为细颗粒层中富集的活泼元素 Ca 和 Sr 的相关性变化被予以分析(图 6C 和 6D),以期从其迁移过程的差异进一步辅助辨别年际冻融层。类似地,选取细颗粒层中富集的稳定元素 Rb 对 Ca 和 Sr 元素信号值进行校正^[21]。结果表明:①冻融过程使得 Ca 元素和 Sr 元素在 3 个旋回细颗粒层中的富集状况出现了分异,特别是 XRF 扫描的元素信号值分异极为明显(图 6C);②相较于常规状态,热融状态下顶部第 3 旋回细颗粒层的 Ca 元素相对 Sr 元素进一步迁移,且比第 1 和第 2 旋回其含量更高。导致上述现象的原因可能是 Ca 和 Sr 元素在黄土中不同赋存形态的含量差异,呈残留态的硅酸盐矿物中 Ca 更易被 Sr 置换,导致更多的 Sr 存留在较稳定的硅酸盐中^[32]。此外,更直观的现象是热融状态下 XRF 扫描的 Ca 和 Sr 元素信号值在沉积柱顶部第 3 旋回细颗粒层呈反向变化(即 Ca 向上富集而 Sr 向下富集),但在第 1 和第 2 旋回细颗粒层则同步变化(图 5)。因此,沉积旋回细颗粒层中 Ca 和 Sr 元素的高含量和高度分异可作为识别年际冻融层的辅助地球化学指标。需指出的是,上述现象需基于相态分离实验进一步分析冻融过程中不同形态碳酸盐内 Ca 和 Sr 元素的含量变化,进而识别其分异机理。总之,黄土高原聚淤/淤地坝沉积序列中的沉积旋回年际划分,需利用“冻豆腐状”形态特征、Ca 和 Fe 元素的高含量和高相关性、Ca 和 Sr 元素的高含量和高度分异等多个理化指标综合鉴别年际冻融层,进而为建立可靠的年代框架并以此重建年际尺度的土壤侵蚀过程和入地关系提供关键科学依据。

4 结论

1) 模拟的 3 个沉积旋回层理清晰,上部细颗粒层主要由黏粒和细粉砂组成,有机质含量高,而亮度和 Zr 元素含量低,下部粗颗粒层则相反,具备黄土高原聚淤/淤地坝内沉积旋回的典型特征。

2) 冷冻后,3 个旋回细颗粒层中水分、碳酸盐及 Ca 元素均向上富集;热融后,在下伏的第 1 和第 2 旋回细颗粒层中水分、碳酸盐及 Ca 元素均向下迁移,在顶部第 3 旋回细颗粒层中则在土水势作用下逆向移动;多次冻融加强了底部第 1 旋回水分和盐类的向上移动。

3) 沉积旋回细颗粒层中 Ca 和 Fe 的高含量和高相关性是鉴别年际冻融层的可靠地球化学指标,而

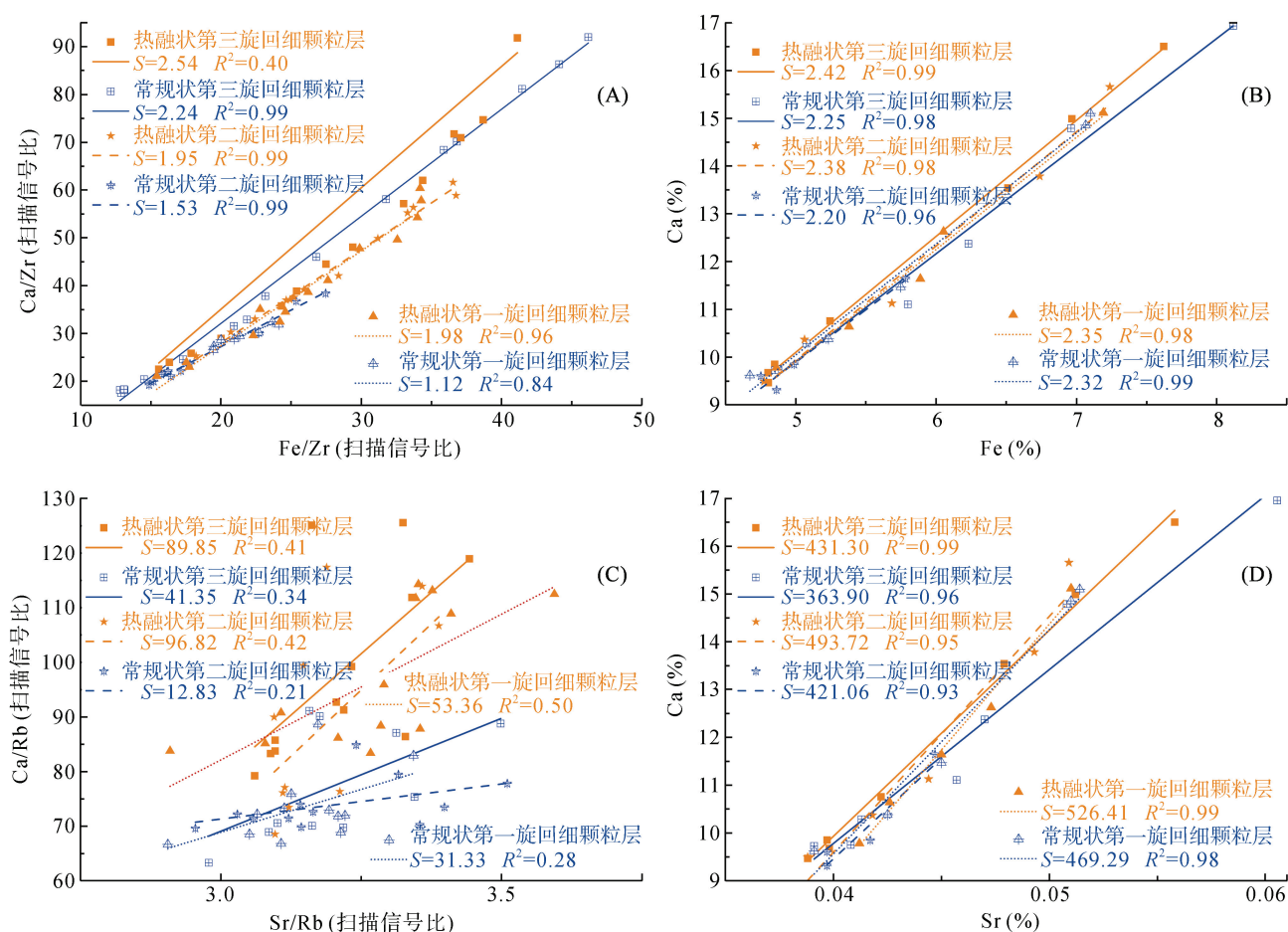


图6 3个旋回细颗粒层在常规状态和热融状态下Ca、Fe、Sr元素相关性：XRF连续扫描的基于Zr校正的Ca和Fe的相关性(A)；Ca和Fe实际含量的相关性(B)；XRF连续扫描的基于Rb校正的Ca和Sr的相关性(C)；Ca和Sr实际含量的相关性(D)

Fig. 6 Correlations of Ca, Fe and Sr elements in fine-grained layers of three deposition couplets under normal and thaw conditions: Between Ca and Fe by XRF core scanning based on Zr correction (A); Between actual Ca and Fe contents (B); Between Ca and Sr by XRF core scanning based on Rb correction (C); Between actual Ca and Sr contents (D)

XRF连续扫描的Ca和Sr元素的高含量和反相关可作为更直观的辅助指标。

参考文献：

- [1] Wang X Q, Wang Z S, Xiao J, et al. Soil erosion fluxes on the central Chinese Loess Plateau during CE 1811 to 1996 and the roles of monsoon storms and human activities[J]. Catena, 2021, 200: 105148.
- [2] 艾开开, 杨乙丹. 明至民国时期黄土高原淤地坝的发展变迁——以陕晋为中心[J]. 农业考古, 2018(6): 134–141.
- [3] 高健翎, 陈小科, 张佃茂. 黄土高原地区淤地坝现状分析[J]. 中国水土保持, 2023(1): 1–5.
- [4] Fang N F, Zeng Y, Ran L S, et al. Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon sequestration on the Chinese Loess Plateau[J]. Communications Earth & Environment, 2023, 4: 65.
- [5] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2015, 9(1): 38–41.
- [6] 王夏青, 彭保发, 李福春, 等. 黄土高原聚淤沉积旋回特征及地球化学划分[J]. 土壤, 2018, 50(5): 1046–1054.
- [7] Wang X Q, Jin Z D, Zhang X B, et al. High-resolution geochemical records of deposition couplets in a palaeo-landslide-dammed reservoir on the Chinese Loess Plateau and its implication for rainstorm erosion[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(3): 1147–1158.
- [8] 龙翼, 张信宝, 李敏, 等. 陕北子洲黄土丘陵区古聚淤洪水沉积层的确定及其产沙模数的研究[J]. 科学通报, 2009, 54(1): 73–78.
- [9] Zhang X, Walling D E, He X, et al. Use of landslide-dammed lake deposits and pollen tracing techniques to investigate the erosional response of a small drainage basin in the Loess Plateau, China, to land use change during the late 16th century[J]. Catena, 2009, 79(3): 205–213.
- [10] 岳大鹏, 袁晓宁, 李奎, 等. 陕北子洲黄土洼坝淤地淤积剖面元素分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 875–882.
- [11] Zhang J Q, Yang M Y, Zhang F B, et al. Revealing soil erosion characteristics using deposited sediment sources in

- a complex small catchment in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2020, 379: 114634.
- [12] Liu C, Wu Z N, He C H, et al. Source identification and chemical compositions of particulate and mineral-associated organic matter in the deposited sediments of a dam-controlled watershed[J]. *Catena*, 2022, 219: 106618.
- [13] Wei Y H, Jiao J Y, Li Y J. Evolution of historical sediment yield using check-dam systems as carriers: A case study in a restored agricultural catchment on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2022, 210: 105877.
- [14] Wang X Q, Liu F G, Zhang X B, et al. Asynchronized erosion effects due to climate and human activities on the central Chinese Loess Plateau during the Anthropocene and its implications for future soil and water management[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47(5): 1238–1251.
- [15] Chen F X, Fang N F, Wang Y X, et al. Biomarkers in sedimentary sequences: Indicators to track sediment sources over decadal timescales[J]. *Geomorphology*, 2017, 278: 1–11.
- [16] Zhao G J, Klik A, Mu X M, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2015, 241: 343–352.
- [17] Wang X Q, Jin Z D, He Z, et al. New insights into dating the sediment sequence within a landslide-dammed reservoir on the Chinese Loess Plateau[J]. *The Holocene*, 2019, 29(6): 1020–1029.
- [18] Wang X Q, Jin Z D, Chen L M, et al. High-resolution X-ray fluorescence core scanning of landslide-dammed reservoir sediment sequences on the Chinese Loess Plateau: New insights into the formation and geochemical processes of annual freeze-thaw layers[J]. *Geoderma*, 2016, 279: 122–131.
- [19] 岳大鹏, 李奎, 陈宝群, 等. 黄土洼古滑塌体引起的环境效应[J]. *山地学报*, 2014, 32(2): 187–194.
- [20] 岳大鹏, 李奎, 刘鹏, 等. 基于 RUSLE 的黄土洼小流域土壤侵蚀与水土保持研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(2): 85–91.
- [21] 张航瑜, 王夏青, 黄平安, 等. XRF 岩芯连续扫描结果的可靠性评估及校正: 以青海湖沉积为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(4): 200–211.
- [22] 段世航, 崔若然, 江荣风, 等. 激光衍射法测定土壤粒径分布的研究进展[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 247–253.
- [23] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25(1): 101–110.
- [24] Fouli Y, Cade-Menun B J, Cutforth H W. Freeze-thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93(4): 485–496.
- [25] 梁巧, 桑正辉, 伍松云, 等. 掺矿渣生态多孔混凝土的冻融试验[J]. *湖南文理学院学报(自然科学版)*, 2017, 29(4): 81–84.
- [26] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 46–55.
- [27] Zhang D F, Wang S J. Mechanism of freeze-thaw action in the process of soil salinization in Northeast China[J]. *Environmental Geology*, 2001, 41(1): 96–100.
- [28] 景国臣, 任宪平, 刘绪军, 等. 东北黑土区冻融作用与土壤水分的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(5): 32–36.
- [29] 朱龙祥, 范昊明, 马仁明. 冻融循环和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(1): 77–88.
- [30] 刘鹏, 岳大鹏, 李奎. 陕北黄土洼淤地坝粗颗粒沉积与暴雨关系探究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 79–83.
- [31] 黄平安, 王夏青, 唐湘玲, 等. X 射线荧光光谱岩心扫描影响因素及校正方法的研究进展[J]. *物探与化探*, 2023, 47(3): 726–738.
- [32] 刘连文, 陈骏, 陈咏, 等. 黄土的连续提取实验及 Rb/Sr 值意义[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 59–64.