

基于静水沉降法的沉积物颗粒分选流程

郭利成^{1,2}, 吴佳斌^{1,2}, 熊尚发¹, 杨石岭¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:沉积物颗粒分选流程在古环境、古气候研究中的应用非常广泛。虽然常用的颗粒分选方法均基于斯托克斯定律,但是在操作过程中试验装置和流程的细微差别会导致不同的分选效果,甚至影响后续理化分析和科学结论。因此,建立一套可靠的分选流程对于颗粒分选至关重要。目前,筛析法和沉降法的组合是被普遍接受的分选流程,前者针对粗颗粒组分,发展较为成熟,后者针对细颗粒组分,在试验器材、试验流程和结果检验等方面还存在较大的改善空间。对此,从静水沉降法原理入手,选择乙酸来去除碳酸盐组分,利用机械震荡法加速化学反应,采用 U 型头虹吸管减少底部粗颗粒上涌带来的分选误差,从而建立了一套可靠的基于静水沉降法的沉积物颗粒分选流程。结果检验显示,分选出的颗粒均服从对数正态分布,且至少 70% 的颗粒能够准确地被分选。建立的完整有效的分选流程较传统流程可以更高效地分选出土壤黏粒和粉砂级颗粒(粒径小于 64 μm),为后续研究打下可靠的基础。

关键词:沉积物颗粒;静水沉降法;U 型头虹吸管;黏粒;粉砂;对数正态分布;分选流程;古环境

中图分类号:X141

文献标志码:A

New Sedimentary Particle Sorting Process Based on Hydrostatic Sedimentation Method

GUO Li-cheng^{1,2}, WU Jia-bin^{1,2}, XIONG Shang-fa¹, YANG Shi-ling¹

(1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sedimentary particle sorting process has been widely used to reconstruct the changes in paleoenvironment and paleoclimate. Common sorting methods of sedimentary particles are mainly based on Stokes Law; however, physicochemical analysis and scientific conclusions will be different if the sorting methods with varied experiment equipment and processes are applied. Therefore, setting up a trustworthy sorting process is vital for particle sorting. During last two decades, the combination of sieve and sedimentation methods has been increasingly used for sorting and measuring sedimentary particles. The former is applied for sieving for the coarse fractions sorting and well developed, while the latter is based on sedimentation rates for the fine fractions, and the experimental equipment, processes and result evaluating should be improved. For this purpose, based on the principle of hydrostatic sedimentation method, the acetic acid was chosen to remove the carbonate component, the mechanical oscillation was applied to accelerate

收稿日期:2016-06-16

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2013CB956400,2015CB953804);中国科学院战略性先导科技专项项目(XDB03020503);国家自然科学基金项目(41272206)

作者简介:郭利成(1988-),男,福建建瓯人,中国科学院大学理学博士研究生,E-mail:guolicheng05@126.com。

通讯作者:熊尚发(1965-),男,江西高安人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:xiongsf@mail.iggcas.ac.cn。

the chemical reaction, and the siphon with U-shaped head was used to reduce the sorting errors which might derive from the upwelling of coarse particles, and a trustworthy sorting process of hydrostatic sedimentation method was set up. The results reveal that all sorted particles obey the lognormal distribution, and at least 70% sorted particles are posited in the expected particle-size ranges. It is concluded that the presented process is reasonable and can sort the clay and silt particles (the partical size is less than $64\ \mu\text{m}$) more successfully than the traditional process does. These particles sorted by this process can be further used in other research projects.

Key words: sedimentary particle; hydrostatic sedimentation method; siphon with U-shaped head; clay; silt; lognormal distribution; sorting process; paleoenvironment

0 引言

粒度是指矿物或碎屑颗粒的大小,决定了岩石的类型和性质,可以有效指示沉积环境或沉积相。因此,粒度被广泛应用于不同时空尺度的古环境、古气候重建工作^[1-3]。然而,粒度也在一定程度上影响岩石其他环境替代指标的解释,因此,如何剔除粒度的影响是通过岩石环境替代指标来揭示过去沉积环境变化的关键。其中,颗粒分选可以有效减小粒度的影响,且其在古环境、古气候研究中的应用也非常广泛^[4-7]。目前,常用的颗粒分选方法均基于斯托克斯定律^[8],但是操作过程中试验装置和流程的细微差别会导致不同的分选效果,甚至影响后续理化分析和科学结论。因此,建立一套可靠的分选流程对于颗粒分选至关重要。

学术界常用的分选流程是筛析法和沉降法的组合^[9-10],前者针对粗颗粒组分,后者针对细颗粒组分,二者均同步获取和称量不同粒级颗粒。筛析法发展较为成熟,如机械振筛仪采用不同粒径的标准金属网筛逐序组合,筛选和称量不同粒级颗粒。根据作用力不同,沉降法分为离心沉降法和静水沉降法。离心沉降法^[11-12]依据离心力修正的斯托克斯沉降公式^[9]来计算不同粒级颗粒在水介质中离心所需时间,进而获得不同粒级颗粒和粒度分布特征。该方法的优点是试验时间短^[13],适合大批量试验,且离心时间通过仪器控制,结果可比性强。然而,该方法离不开特定的离心装置,实际的力学计算较为复杂,结果检测难度大。

静水沉降法(又称吸管法)^[9,14-16]根据不同粒级颗粒在静水中受重力作用具有不同的沉降速率,可以分选不同粒级颗粒并测量其含量。20世纪,Liu等比较了比重计法和静水沉降法所测土壤黏粒和粉砂级颗粒的含量,发现两者十分接近^[17]。Pennington等用静水沉降法检验了电极法所测土壤黏粒的

含量,发现静水沉降法和电极法所测土壤黏粒的含量具有很好的相关性^[18]。近年来,Hao等在中新世以来的地层沉积物中比较了沉降法和激光粒度仪的测量结果,认为沉降法更能有效测量土壤黏粒的含量,获取的不同粒级颗粒还为后续研究提供了材料^[6]。因此,静水沉降法可以很好地分选并测量土壤黏粒和粉砂级颗粒的含量(粒径小于 $64\ \mu\text{m}$),并在不同领域均有应用:黏土矿物的提取^[19-20]、巴西东南部 Guapi-Macacu 流域中晚全新世河流动力学研究^[21]、粒度对黄土磁学参数的影响^[22]、识别沉积物成壤作用^[6]、过去化学风化历史^[4]以及沉积物磁学特征^[7]等。

目前,应用静水沉降法所开发的仪器仅有 SEDIMAT 4-12 土壤粒度分析系统,其通过程序控制来测量特定几个粒级颗粒的含量,但无法同步获取相应粒级颗粒;应用静水沉降法的相关论文均只给出了主要步骤,但缺少步骤讨论和结果检验,给数据对比带来了困难;虽然少数论文直接利用扫描电镜方法进行粒度测量并获得投影后的颗粒直径,一定程度上完成了结果检验,但与颗粒真实粒径的可比性需要进一步商榷;已有的细颗粒分选流程存在诸多不足。基于此,本文完善了相关分选流程再结合具体试验建立了一套可靠的静水沉降法分选流程,以期今后相关研究提供参考。

1 原理

不同粒级颗粒在静水中受到重力作用具有不同的沉降速率。利用这一特征可以分选出不同粒级颗粒并测量其含量。本文依据传统的斯托克斯沉降公式^[9]来计算不同粒级颗粒在静水中沉降相同深度所需时间,进而分选出不同粒级颗粒。本试验假设每个颗粒为球粒,表面光滑,密度相同;颗粒不受水分子布朗运动影响,相互间无干扰,亦不存在紊流运动。基于此,在一定水温下,沉降速率(v)的理论公

式为

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_f)gd^2}{18\eta} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为颗粒密度; ρ_f 为水密度; η 为水的黏滞系数; d 为颗粒粒径; g 为重力加速度。

砂粒沉降不服从斯托克斯定律, 因此, 式(1)适用的粒径上限是 $64 \mu\text{m}$ ^[9]。假定颗粒沉降速率几乎在沉降开始就立即达到, 匀速沉降一定深度(h)所需沉降时间(t)为

$$t = \frac{18h\eta}{(\rho_s - \rho_f)gd^2} \quad (2)$$

对于水的不同温度和黏滞系数^[23], 根据式(2)可求得不同粒级颗粒在静水中沉降 10 cm ^[13,16] 所需时间(表 1)。其中, 颗粒常用密度值^[24]取 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 也可以根据实际沉积物颗粒密度来计算其沉降时间。

表 1 不同粒级颗粒沉降 10 cm 所需时间

Tab. 1 10 cm Setting Time of Different Sedimentary Particles

温度/ ℃	黏滞系数/ [$\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$]	不同粒级颗粒沉降 10 cm 所需时间				
		$2 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m}$	$63 \mu\text{m}$
16	0.011 110	08:34:48	01:22:22	00:05:10	00:00:50	00:00:32
17	0.010 830	08:21:50	01:20:18	00:05:02	00:00:50	00:00:32
18	0.010 560	08:09:18	01:18:18	00:04:54	00:00:48	00:00:30
19	0.010 300	07:57:16	01:16:22	00:04:48	00:00:46	00:00:30
20	0.010 050	07:45:40	01:14:32	00:04:40	00:00:46	00:00:30
21	0.009 810	07:34:34	01:12:44	00:04:34	00:00:44	00:00:28
22	0.009 579	07:23:52	01:11:02	00:04:28	00:00:44	00:00:28
23	0.009 358	07:13:38	01:09:24	00:04:22	00:00:42	00:00:28
24	0.009 142	07:03:36	01:07:48	00:04:16	00:00:42	00:00:26
25	0.008 937	06:54:06	01:06:16	00:04:10	00:00:40	00:00:26

注: 黏滞系数引自文献[23]。

2 试验流程

本文所使用 62 个样品采自柴达木盆地新生代河湖相地层, 提取的粒级分别为粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 、粒径在 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 和粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 。粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒沉降 10 cm 所需时间短(表 1), 在操作上很容易引起较大误差, 因此, 沉降法很难准确地测量粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒含量, 故这部分颗粒不做结果检验。图 1 为本文所设计的基于静水沉降法的沉积物颗粒分选流程。

2.1 原液制备

将样品破碎(不可磨碎), 称取样品约 10 g , 倒入 250 mL 的三角烧杯。先加入 30% 的 H_2O_2 溶液 20 mL 以去除有机质组分^[25], 置于 HY-4H-JB 型恒速三角瓶振荡器中振荡 30 min 以加速反应(振荡速率为 $120 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$), 之后静置 30 min 。如果部分

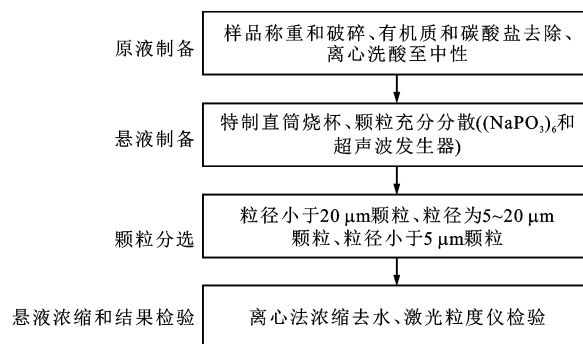


图 1 基于静水沉降法的沉积物颗粒分选流程

Fig. 1 Flow Diagram for Sedimentary Particle Sorting Process Based on Hydrostatic Sedimentation Method

样品有机质含量较高, 继续加入 30% 的 H_2O_2 溶液 10 mL 以去除过量有机质。接着加入 $1.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的乙酸溶液 40 mL ^[16] 以去除碳酸盐组分, 同样置于振荡器中以 $120 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率振荡 30 min 以加速反应, 之后静置 30 min 。重复上述加乙酸步骤, 之后静置约 24 h 。用 pH 试纸检验碳酸盐是否完全去除, 若试纸未变红, 可继续加入 $1.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的乙酸溶液 10 mL 重复振荡过程, 之后静置 12 h 。至碳酸盐完全反应, 即可结束加乙酸反应流程。最后, 将反应后的溶液转移至 350 mL 的离心杯, 利用离心机进行洗酸(转速为 $3500 \text{ 转} \cdot \text{min}^{-1}$, 时间为 10 min)至溶液近中性。

2.2 悬液制备

将制备的中性溶液转移至特制直筒烧杯(约 2 L)中搅拌均匀, 加入分散剂($0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液) 20 mL ^[26], 置于超声波发生器中将颗粒充分散开^[27-28], 之后加蒸馏水稀释至标记好的刻度线(图 2)。

2.3 颗粒分选

首先分选出粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 的颗粒(图 1)。充分搅拌直筒烧杯中的颗粒, 将玻璃杯放置烧杯中, 待溶液尽可能达到(准)静止状态, 取出玻璃棒开始记录时间, 即为颗粒沉降的起始时间。经过表 1 所计算的时间后, 用 U 型头虹吸管吸出上层 10 cm 的悬液[图 2(a)]并收集, 重复上述过程, 共抽提 $8 \sim 12$ 次, 直至 Mastersize 3000 粒度仪测得直筒烧杯上层 10 cm 的液体中颗粒的最大粒径为 $1 \mu\text{m}$ 为止。其中, U 型头虹吸管需要贴壁缓慢下移[图 2(b)], 尽可能避免紊流影响。此时, 样品中粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒基本上提取完毕, 粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒亦收集。接着, 对分选出粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒按表 1 所计算的时间, 利用同样的分选方法分选出粒径小于

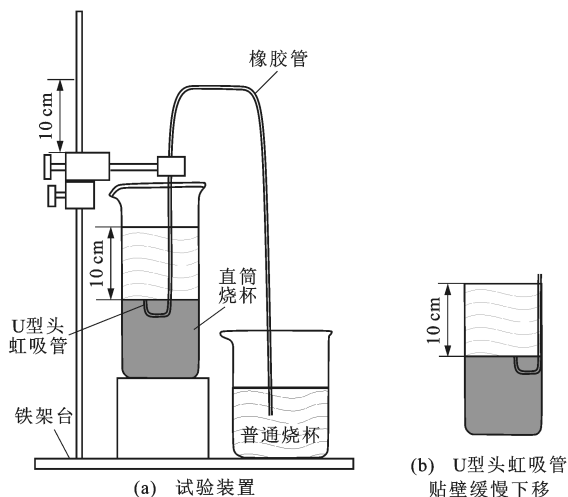


图2 U型头虹吸管及虹吸装置

Fig. 2 Siphon with U-shaped Head Within the Siphon Device

5 μm 和粒径为 5~20 μm 颗粒。

2.4 悬液浓缩

本文对含粒径小于 5 μm 、粒径为 5~20 μm 和粒径大于 20 μm 颗粒的悬液使用离心法去除部分水。将吸出的悬液置于离心机(转速为 4 500 转 $\cdot\text{min}^{-1}$, 时间为 30 min)中进行分离。去除悬液中的水亦可采用抽滤法,利用巴氏滤管接上真空泵抽吸水分^[16,19];也可采用聚沉法,滴加 3 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸溶液使吸出的悬液聚沉。离心法和抽滤法均存在极细颗粒的损失,仅聚沉法无损伤。根据不同研究目标,在误差允许范围内,选择不同悬液浓缩方法。

2.5 结果检验

用 Mastersize 3000 粒度仪进行结果检验。取约 0.1 g 样品置于 50 mL 烧杯中,加入分散剂(0.05 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液)10 mL,置于超声波发生器中充分将颗粒散开。用粒度仪测量每个样品所分选出的粒径小于 5 μm 和粒径为 5~20 μm 颗粒含量,重复测量 3 次,相对标准偏差均小于 2%,剩余样品供后续研究项目使用。

3 结果分析与讨论

3.1 试验器材改进

不同实验室采取不同的样品前处理流程。部分研究者认为盐酸(强酸)基本上可去除碳酸盐组分^[19],但也破坏了黏土矿物的晶格^[16],引起 Fe 元素部分流失。本文采用乙酸(弱酸)去除碳酸盐组分,尽管反应时间缓慢,但却较好地保持了颗粒的完整性^[16],利于颗粒分选,减缓元素流失。为了加速去除有机质和碳酸盐组分,部分研究者直接对样品

进行加热,实际上很可能破坏了颗粒结构,导致颗粒分选存在偏差^[29]。此外,部分研究者采用磁力搅拌器^[20],不破坏颗粒结构,但很可能引入纯铁,对后续测量 Fe 元素含量的研究不利。也有部分研究者使用手动搅拌,而不同试验人员或者同一试验人员在不同时间段的操作存在差异,很难达到一致的反应时间和搅动强度,也很难使样品充分反应。参照美国土壤学会水平振荡方法^[16],本文使用 HY-4H-JB 型恒速三角瓶振荡器对原液进行充分振荡,以达到充分反应的目的。一致的反应时间和振荡强度增强了结果可比性。此外,对样品不加热,仅物理操作,颗粒完整且不引入杂质。

沉降法中关键的一步是悬液吸取,即从沉降筒(特制直筒烧杯)中吸取上部 10 cm 的液体,且不引起 10 cm 以下的粗颗粒上涌(图 2)。早期利用虹吸原理直接吸取悬液^[17-18],引起底部粗颗粒紊流运动,带来分选误差。Moshrefi 提出利用注射器来吸取悬液,但细颗粒很容易堵塞针管^[30]。大部分研究者采用直管型虹吸管,同样存在底部粗颗粒上涌引起的分选误差。本文采用 U 型头虹吸管吸取悬液,尽管引起上部 10 cm 液体产生向下的紊流,加速了颗粒的沉降速率,但通过重复试验可以提高精度,尽可能减少底部粗颗粒上涌引起的分选误差。

3.2 结果检验

结果检验显示,改进流程所分选出的颗粒总体上服从对数正态分布(图 3),与自然状态下粒度分布特征吻合,结果可比性强。其中,所获取的粒径小于 5 μm 和粒径为 5~20 μm 颗粒能够成功分布在所属的粒度区间的体积分数分别为 73.84% 和 74.23%(表 2)。由图 3 可知,两个粒级颗粒的众数

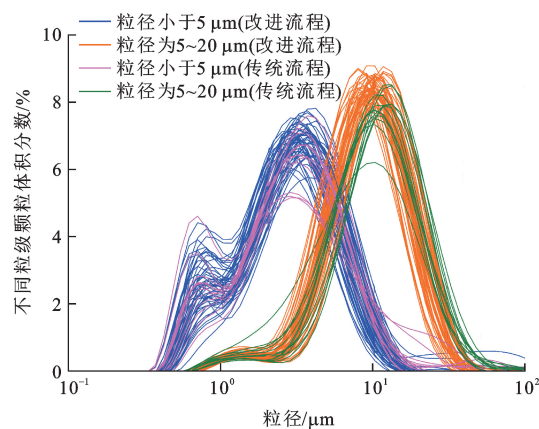


图3 不同粒级颗粒的粒度分布

Fig. 3 Distribution of Particle Size in Different Particle-size Fractions

表 2 62 个样品所分选出不同粒级颗粒的平均体积分数

Tab. 2 Average Volume Fractions of Particles in Different Particle-size Fractions Sorted from 62 Samples

样品类型	流程方法	不同粒级颗粒的平均体积分数			样品数
		<5 μm	5~20 μm	>20 μm	
粒径小于 5 μm 颗粒	改进流程(乙酸、机械振荡和 U 型头虹吸管)	73.84%±1.94%	25.81%±1.92%	0.34%±0.39%	50
粒径为 5~20 μm 颗粒	改进流程(乙酸、机械振荡和 U 型头虹吸管)	13.05%±0.95%	74.23%±0.45%	12.72%±1.08%	50
粒径小于 5 μm 颗粒	传统流程(乙酸、手动搅拌和直管型虹吸管)	67.54%±2.25%	30.56%±2.20%	1.90%±1.23%	12
粒径为 5~20 μm 颗粒	传统流程(乙酸、手动搅拌和直管型虹吸管)	11.27%±2.56%	65.99%±1.71%	22.75%±2.53%	12

值均在粒级上限值左侧,且 5 μm 正好是二者的相交界线。考虑到沉降法和激光粒度仪均假设颗粒为球粒以及应用斯托克斯沉速公式等多个前提条件,从结果检验来看,分选流程成功分选出粒径小于 5 μm 和粒径为 5~20 μm 颗粒。

此外,本文试验排除有机质组分外壳聚合体的干扰^[29],流程选择乙酸、机械振荡和 U 型头虹吸管等器材,增加了结果的可靠性。改进流程分选出的粒径小于 5 μm 和粒径为 5~20 μm 颗粒粒径分布较传统流程偏左(图 3)。统计结果也显示分选出的粒径小于 5 μm 和粒径为 5~20 μm 颗粒组分粗的颗粒含量低于传统流程(表 2),说明在传统流程中手动搅拌和直管型虹吸管的使用会引起分选结果偏粗。然而,由图 3 也可以看出,改进流程中少数分选出的粒径小于 5 μm 颗粒的组分中存在粒径大于 20 μm 的颗粒,其原因主要是这部分样品中粗砂含量高,分选结果差,这也说明了静水沉降法不适用于粗颗粒沉积物的颗粒分选^[9]。因此,本文建立了完整且合理的静水沉降法试验流程,较传统流程可以更高效地分选出土壤黏粒和粉砂级颗粒(粒径小于 64 μm),至少 70% 的颗粒能够准确地被分选,为后续研究提供了可靠的材料。

4 结 语

本文选择乙酸去除碳酸盐组分,较好地保持了颗粒的完整性,减缓了元素流失;利用机械振荡法来加速化学反应,成本低,标准化,不引入杂质;采用 U 型头虹吸管尽可能减少了底部粗颗粒上涌引起的分选误差。结果检验显示,分选出的颗粒仍服从对数正态分布,与自然状态下粒度分布特征吻合,可比性强,至少 70% 的颗粒能够被准确分选,分选效果较传统流程好。因此,本文建立了完整且有效的静水沉降法沉积物颗粒试验流程,较传统流程可以更高效地分选出土壤黏粒和粉砂级颗粒(粒径小于 64 μm),为后续研究打下了可靠的基础。

中国科学院地质与地球物理研究所唐自华副研

究员在论文撰写中提供了帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献 :

References :

[1] DING Z L, YU Z W, YANG S L, et al. Coeval Changes in Grain Size and Sedimentation Rate of Eolian Loess, the Chinese Loess Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(10): 2097-2100.

[2] YANG S L, DING Z L. A 249 kyr Stack of Eight Loess Grain Size Records from Northern China Documenting Millennial-scale Climate Variability [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15(3): 798-814.

[3] YANG S L, DING F, DING Z L. Pleistocene Chemical Weathering History of Asian Arid and Semi-arid Regions Recorded in Loess Deposits of China and Tajikistan[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(7): 1695-1709.

[4] XIONG S F, DING Z L, ZHU Y J, et al. A ~6 Ma Chemical Weathering History, the Grain Size Dependence of Chemical Weathering Intensity, and Its Implications for Provenance Change of the Chinese Loess-red Clay Deposit[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(15): 1911-1922.

[5] 李 洋, 李徐生, 韩志勇, 等. 黄土不同粒级稀土元素分布特征及其制约因素[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 972-984.

LI Yang, LI Xu-sheng, HAN Zhi-yong, et al. The Distribution of REE in Different Particle Size Fractions of Loess and Restraining Factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(4): 972-984.

[6] HAO Q Z, OLDFIED F, BLOEMENDAL J, et al. Particle Size Separation and Evidence for Pedogenesis in Samples from the Chinese Loess Plateau Spanning the Past 22 m. y. [J]. Geology, 2008, 36(9): 727-730.

[7] 姜兆霞, 刘青松. 上新世末期—更新世早期西北太平洋 ODP882A 孔沉积物的磁学特征及其古气候意义[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(9): 1242-1252.

JIANG Zhao-xia, LIU Qing-song. Magnetic Characterization and Paleoclimatic Significances of Late Pliocene-Early Pleistocene Sediments at Site 882A,

- Northwestern Pacific Ocean[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(9): 1242-1252.
- [8] STOKES G G. On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums[M] // Cambridge Philosophical Society. Transactions of the Cambridge Philosophical Society. Cambridge: Cambridge University Press, 1850: 9-107.
- [9] GEE G W, BAUDER J W. Particle Size Analysis[C] // KLUTE A. Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 1986: 383-411.
- [10] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1978.
- Shanbei Team, Chengdu College of Geology. Particle-size Analysis of Sedimentary Rock and Its Application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978.
- [11] ANDERSON D W, SAGGAR S, BETTANY J R, et al. Particle Size Fractions and Their Use in Studies of Soil Organic Matter: I. The Nature and Distribution of Forms of Carbon, Nitrogen, and Sulfur[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(4): 767-772.
- [12] YAMAMOTO T, SHINYA T, FUKUI K, et al. Classification of Particles by Centrifugal Separator and Analysis of the Fluid Behavior[J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(2): 294-299.
- [13] 武天云, SCHOENAU J J, 李凤民, 等. 利用离心法进行土壤颗粒分级[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 477-481.
- WU Tian-yun, SCHOENAU J J, LI Feng-min, et al. Soil Particle Size Fractionation with Centrifugation Method[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 477-481.
- [14] BEUSELINCK L, GOVERS G, POESEN J, et al. Grain-size Analysis by Laser Diffractometry: Comparison with the Sieve-pipette Method[J]. Catena, 1998, 32(3/4): 193-208.
- [15] MILLER W P, MILLER D M. A Micro-pipette Method for Soil Mechanical Analysis[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1987, 18(1): 1-15.
- [16] GEE G W, OR D. Particle Size Analysis[C] // DANE J H, TOPP C G. Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002: 255-295.
- [17] LIU T K, ODELL R T, ETTER W C, et al. A Comparison of Clay Contents Determined by Hydrometer and Pipette Methods Using Reduced Major Axis Analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30(6): 665-669.
- [18] PENNINGTON K L, LEWIS G C. A Comparison of Electronic and Pipet Methods for Mechanical Analysis of Soils[J]. Soil Science, 1979, 128(5): 280-284.
- [19] 李 琨. 沉积岩中黏土矿物提纯方法[J]. 地质科学, 1982(1): 117-120.
- LI Li. The Method for Purifying Clay Minerals of Sedimentary Rocks[J]. Scientia Geologica Sinica, 1982(1): 117-120.
- [20] ZHANG C X, GUO Z T. Clay Mineral Changes Across the Eocene-Oligocene Transition in the Sedimentary Sequence at Xining Occurred Prior to Global Cooling [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 411: 18-29.
- [21] ANDRE K, NEHREN U, BEHLING H, et al. Mid- and Late Holocene Fluvial Dynamics in the Tropical Guapi-Macacu Catchment, Southeast Brazil: The Role of Climate Change and Human Impact[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 426: 308-318.
- [22] OLDFIELD F, HAO Q Z, BLOEMENDAL J, et al. Links Between Bulk Sediment Particle Size and Magnetic Grain-size: General Observations and Implications for Chinese Loess Studies[J]. Sedimentology, 2009, 56(7): 2091-2106.
- [23] TANNER C B, JACKSON M L. Nomographs of Sedimentation Times for Soil Particles Under Gravity or Centrifugal Acceleration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1948, 12: 60-65.
- [24] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- HUANG Chang-yong. Pedology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] PANSU D M, GAUTHEYROU J. Handbook of Soil Analysis[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [26] MAEDA T, TAKENAKA H, WARKENTIN B P. Physical Properties of Allophane Soils[J]. Advances in Agronomy, 1977, 29: 229-264.
- [27] EDWARDS A P, BREMNER J M. Use of Sonic Vibration for Separation of Soil Particles[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1964, 44(3): 366.
- [28] EDWARDS A P, BREMNER J M. Dispersion of Soil Particles by Sonic Vibration[J]. European Journal of Soil Science, 1967, 18(1): 47-63.
- [29] FEDOTOV G N, SHEIN E V, PUTLYAEV V I, et al. Physicochemical Bases of Differences Between the Sedimentometric and Laser-diffraction Techniques of Soil Particle-size Analysis[J]. Eurasian Soil Science, 2007, 40(3): 281-288.
- [30] MOSHREFI N. A New Method of Sampling Soil Suspension for Particle-size Analysis[J]. Soil Science, 1993, 155(4): 245-248.