

滑坡滑带(面)土及堆积物的粒度多组分分布特征研究*

殷志强^{①②} 魏刚^③ 唐永光^④

(①中国地质环境监测院 北京 100081)

(②中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

(③青海省环境地质勘查局 西宁 810007)

(④山东省地矿工程集团公司 济南 250013)

摘要 文章利用高分辨率激光粒度仪 MS2000 对我国典型地区 5 种沉积类型滑坡的滑带(面)土和滑坡细粒堆积物的粒度多组分分布特征进行了系统、深入研究,总结了不同沉积类型滑坡滑带(面)土与滑坡堆积物的粒度多组分分布特征及差异性,其对于认识滑坡的成因机制具有重要的理论和实践意义。研究认为:(1)不同沉积类型的滑坡滑带(面)土和滑坡堆积物的粒度一般含有 4 个组分,其分别为风成的细、中、粗粒组分和水成的悬浮组分;(2)不同地区不同沉积类型的滑坡其滑带(面)土粒度与滑坡堆积物的粒度多组分具有不同的分布特征;(3)同一地区滑坡的滑带(面)土与滑坡堆积物的粒度多组分分布特征有较大差异,主要受控于滑坡本身的形成演化过程。

关键词 滑坡 滑带土 粒度 多组分分布特征

中图分类号:TU446 文献标识码:A

CHARACTERISTICS OF MULTI-MODEL GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF SLIP SURFACE SOILS AND DEPOSITS OF LANDSLIDES

YIN Zhiqiang^{①②} WEI Gang^③ TANG Yongguang^④

(①China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081)

(②Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(③Qinghai Environmental Geological Prospecting Bureau, Xining 810007)

(④Shandong Provincial Corporation for Geology and Mineral Resources Engineering, Jinan 250013)

Abstract This paper mainly examines the characteristics of the multi-model grain size distribution of slip surface soils and fine-grained deposits of landslides. It uses the high-resolution laser grain size analyzer MS2000 in five typical sedimentary areas of China. Then It summarizes the characteristics between the discrepancies of different types of slip surface soils and landslide deposits. The characteristics have important theoretical and practical significances for understanding the formation of landslide mechanism. The test results show that: 1) There are at most four models (median size are $<1\mu\text{m}$, $1\sim 10\mu\text{m}$, $10\sim 100\mu\text{m}$, $100\sim 500\mu\text{m}$, respectively) that are superimposed to constitute of landslide slip surface soil and the deposits in the different types of sedimentary areas. The characteristics of multi-models grain size distribution are the fine, median and coarse grain of suspension and saltation. 2) Different types of landslides slip surface soils and the deposits can have significantly different characteristics of grain size dis-

* 收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-04.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40802089)资助.

第一作者简介: 殷志强, 主要从事地质灾害与第四纪地质研究工作. Email: yinzq@mail.cigem.gov.cn

tribution. 3) the grain size discrepancy of landslides slip surface soils and the deposits in the same area can be controlled by the formation and evolution of landslides themselves.

Key words Landslide, Slip surface soil, Grain size multi-model distribution characteristics, Laser grain size analyzer

1 引言

滑带土是滑坡的重要组成部分,与滑坡的形成发育及其稳定性关系密切。开展滑带土的研究是滑坡工程地质研究的基础内容,现已成为地质灾害领域的研究热点^[1]。当前关于滑坡滑带土的研究主要集中在对滑带(面)的辨识和滑带土的强度特性研究等方面,如胡瑞林等^[2]认为滑带土主要从野外地质判断、现场勘探、位移监测和地球物理探测等方面进行识别和鉴定;刘小丽等^[3]认为滑带土的强度特性主要包括滑带土的峰值抗剪强度、残余抗剪强度、完全软化强度、滑坡启动强度、长期抗剪强度等方面;李晓^[4]认为同一滑带遭受滑动的次数越多,其细颗粒成分和黏土矿物通常也越多。易顺民等^[5, 6]就三峡库区树坪滑坡、黄腊石滑坡和西藏樟木扎美拉山滑坡、友谊桥滑坡的滑带土的粒度分维特征进行了研究,认为上述滑坡滑带土粒度的分维值位于2~3之间,平均值为2.85,分维值的大小揭示了滑带土的形成演化特征。该研究表明滑坡滑带土粒度分布具有很好的分形结构特征,即具有多组分分布特征。

沉积物粒度由于其测试简便、环境意义指示明确、对古气候信息反应灵敏等优点已在第四纪古气候研究的各个领域用来指示古环境古气候的变化及意义^[7~11]。沉积物粒度的多组分分布特征研究是当前沉积物动力机制研究的主要进展,也是过去沉积物粒度研究的深入和发展。沉积物粒度一般由多个粒度组分叠加构成^[12~15],土质滑坡的滑带(面)土滑坡堆积物是沉积物,也具有沉积物的粒度多组分分布特征。

前人对滑带土理化特性及其粒度组成研究工作为揭示滑带土对滑坡发育的贡献做了大量工作,但对滑带土的组成特征及其成因意义,如滑带土本身的粒度组成、区域差异以及滑带土与滑坡堆积物粒度组分关系等研究较少。同时由于滑带土的形成、物质组成、微观结构及赋存环境等的多样性,使得滑带土与滑坡体中其他部位的岩土体存在有较大的差别^[16]。因此,滑坡滑带土本身及其堆积物的粒度组

成的揭示有利于认识滑坡滑带土的强度特征、滑坡的形成机理,也对滑坡体的复活具有重要的指示意义,进而可以为滑坡的防治提供理论依据。

2 样品和方法

2.1 样品

样品采自我国滑坡灾害非常严重的云南哀牢山地区红河县(干热河谷风化壳滑坡类型)、四川雅安地区(昔格达地层滑坡类型)、黄河上游地区的尖扎县、化隆县、贵德县(第三系红黏土滑坡类型)、兰州市区及永靖县(第四系黄土滑坡类型)以及福建德化县(台风暴雨滑坡类型)等地,共采集不同地区的典型滑坡27处,每处滑坡在钻孔岩性、滑坡后缘、侧缘等地取滑带(面)土、滑体堆积物样品2~4个,共取滑坡样品71个(图1,表1)。

2.2 粒度测试与组分特征

滑带(面)土及滑体堆积物样品粒度测试实验均利用笔者以前发表的文章中介绍的方法完成的^[12]。该方法在样品0.02~2000 μm 粒径测量范围、精度等方面具有很强的优势,根据测试结果输出各个粒径组分的百分含量、频率累积曲线等内容,能够清晰地分析各个粒径组分的古环境古气候信息。

通过对滑坡滑带(面)土及堆积物样品粒度组分分布曲线研究分析,认为样品的每一个组分均符合标准正态分布。因此笔者借用已成熟的标准公式对滑坡滑带(面)土及堆积物样品的各组分进行了组分分离^[13]。通过对研究区的多处典型样品的粒度数据综合对比分析后,笔者发现滑坡滑动带(面)土和滑坡堆积物粒度概率累积曲线一般由4个组分组成(图2),其中值粒径范围从细到粗依次为:第1组分为0~1 μm ,此范围段的粒径属于风成悬浮组分中的细粒组分(Fine grain-size),并以0.6~0.9 μm 的百分含量占绝大多数;第2组分为1~10 μm ,此范围段的粒径属于风成悬浮组分的中粒组分(Medium grain-size),并以6~8 μm 的百分含量占绝大多数;第3组分为10~100 μm ,此范围段的粒径属于风成悬浮组分中的粗粒组分(Coarse grain-

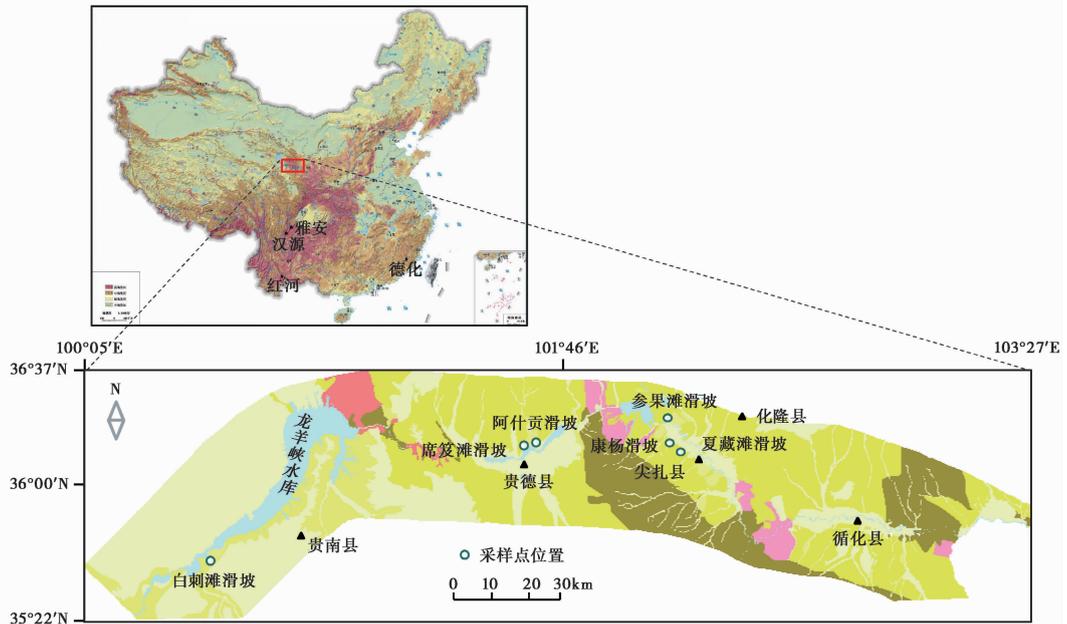


图1 滑坡样品采集点分布图

Fig. 1 Location of landslides sampling sites

表1 滑坡采样点详细描述

Table 1 Description of landslides sampling sites

代码	样品采集地区	经度	纬度	样品采集位置	个数
ALS	云南哀牢山红河县	102°42'	23°37'	滑坡滑带土	1
YA	四川雅安地区	102°38'	29°21'	昔格达地层滑坡滑带土	3
QH/SGT	黄河上游地区	101°31'	36°05'	红黏土、黄土滑坡滑带土及滑坡堆积物	12
DH	福建德化县	118°11'	25°32'	滑坡滑带(面)土	19
LZ	兰州市区及永靖县	103°19'	36°05'	黄土滑坡滑带(面)土及滑体堆积物	36

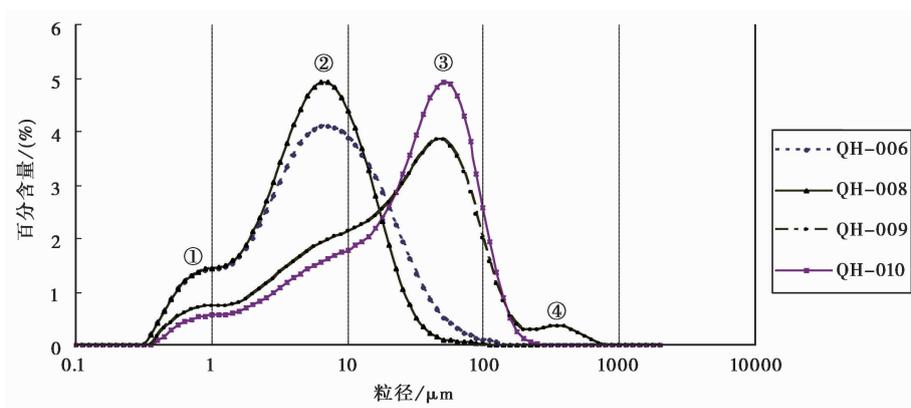


图2 滑坡滑动带土与滑坡堆积物粒度组分

Fig. 2 The multi-modal grain size of landslide sliding zone soil and its deposits

①粒度第一组;②粒度第二组;③粒度第三组;④粒度第四组

size),并以 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ 的百分含量占大部分;第四组分为 $100 \sim 500 \mu\text{m}$,此范围段的粒径属于水成的悬浮组分(Suspension grain-size)。

笔者选择研究区内的典型滑坡的滑带(面)土

与滑体堆积物的 15 个样品的粒度数据输入粒度组分离计算机程序进行组分离,分离后得到 15 个样品各组分的相关参数(表 2)。

表2 样品粒度各组分参数

Table 2 Parameters of various grain-size fractions of samples

编号	1M			2M			3M			4M		
	<i>Md</i>	σ	%									
ALS-001	0.7	3.5	5.4	9.3	9.9	80.6	55.4	4.4	12.8	404.0	2.4	1.3
QH-003	0.8	3.5	2.8	8.3	9.8	29.0	50.7	4.6	68.3			
QH-005	0.8	3.5	3.3	9.3	9.0	56.0	60.8	5.5	40.8			
QH-007	0.9	4.6	9.8	9.6	8.3	89.4				415.2	3.0	0.9
QH-009	0.8	3.9	4.9	8.7	9.9	49.5	50.4	5.4	43.4	375.1	2.6	2.3
SGT-01	0.8	4.5	8.9	8.3	7.9	83.3	100.1	4.3	5.3	441.8	2.8	2.6
DH-001	0.8	5.0	18.3	7.8	8.8	79.1	100.6	1.9	0.5	437.1	2.8	2.1
DH-016	0.7	4.0	9.6	6.0	10.1	71.1	91.7	6.1	17.8	393.1	3.0	1.5
DH-018	0.7	3.5	8.6	5.2	8.6	61.6	21.4	5.1	16.8	105.5	5.8	13.0
LZ-004	0.9	4.5	5.1	9.6	8.9	32.4	50.7	4.6	62.5			
LZ-005	0.9	4.3	4.4	9.9	8.6	27.4	49.5	4.6	68.3			
LZ-016	1.0	4.8	7.1	9.0	8.1	42.1	42.8	5.1	50.8			
LZ-017	0.9	4.3	6.6	8.5	9.1	48.9	46.8	4.9	44.5			
LZ-018	0.9	4.3	6.1	8.1	8.4	38.6	40.4	5.1	55.3			
LZ-023	0.7	4.0	10.4	6.9	9.6	40.1	30.3	4.9	49.5			

Md. 中值粒径; σ . 标准差; %. 百分含量。

3 分析与讨论

3.1 不同沉积类型滑坡滑带(面)土粒度多组分分布特征

3.1.1 台风暴雨型滑坡

样品采自福建省德化县多处滑坡的侧缘、后缘等滑坡滑带(面)土部位。该地区的滑坡主要受降雨的控制,尤其以台风引发的暴雨最为典型,如霞碧滑坡、亭头滑坡、石山滑坡等。

由图3可知,滑坡滑带(面)土的粒度组成表现为4个组分,其中以第二组分(1~10 μm)为优势组分,中值粒径集中在5~8 μm ,该组分粒径百分含量最高,一般为60%~80%,该地区的滑坡主要发生于该组分控制的粒径范围内。位于该区间的细粒的黏土矿物<2 μm 和4~10 μm 的两个组分有利于形成滑坡的滑动面,颗粒越细则其孔隙度越小,会造成其结构更致密、透水性更差,反过来抑制滑坡的发生,如果夹杂有大颗粒物质形成足够的孔隙空间,会更有利于水的渗入从而导致滑坡的发生。

3.1.2 黄土滑坡

黄土滑坡的采样点位于兰州市区皋兰山及黄河上游的永靖县黑方台、盐锅峡、黄茨等地的典型现代滑坡滑带(面)上。该地区处于陇西黄土堆积区,黄

土滑坡极其发育。笔者在该地区的黑方台滑坡、黄茨滑坡、黄茨东滑坡、皋兰山滑坡、九州滑坡等地采集了多处黄土滑坡的滑带(面)土样品,粒度曲线显示黄土滑坡的滑带(面)土以第三组分为优势组分,中值粒径范围普遍为40~70 μm ,百分含量最高可达68%。该地区黄土滑坡的滑带土粒度均为此特征(图4)。

3.1.3 第三系红黏土滑坡

第三系红黏土滑坡样品采自黄河上游龙羊峡-刘家峡干流区内,该区段380km区域内分布有全新世以前及全新世以来发育的古(老)巨型、特大型滑坡19处,滑坡堆积物的残留总方量为60.96 $\times 10^8\text{m}^3$ 。其中体积>1 $\times 10^8\text{m}^3$ 的巨型滑坡11处,如夏藏滩滑坡I期。体积>1 $\times 10^7\text{m}^3$ 的特大型滑坡8处,且多为早期滑坡前缘的再次滑动,如夏藏滩滑坡II期。笔者野外实地调查发现,各盆地、各区段、干流两岸分布发育很不均匀,其中滑坡发育个数最多、残留总方量最多、密度强度最大的是群科-尖扎盆地,其物质组成主要为第三系泥岩滑坡,达到8处;其次循化盆地3处,积石峡峡谷区3处,共和盆地2处,贵德盆地2处,官亭盆地1处。各滑坡前缘受黄河的冲刷、掏蚀以及人类工程活动等影响,时常发生崩塌及次一级滑坡,部分滑坡前缘河流相二元结构以及滑坡的滑带(面)清晰可辨(图5)。

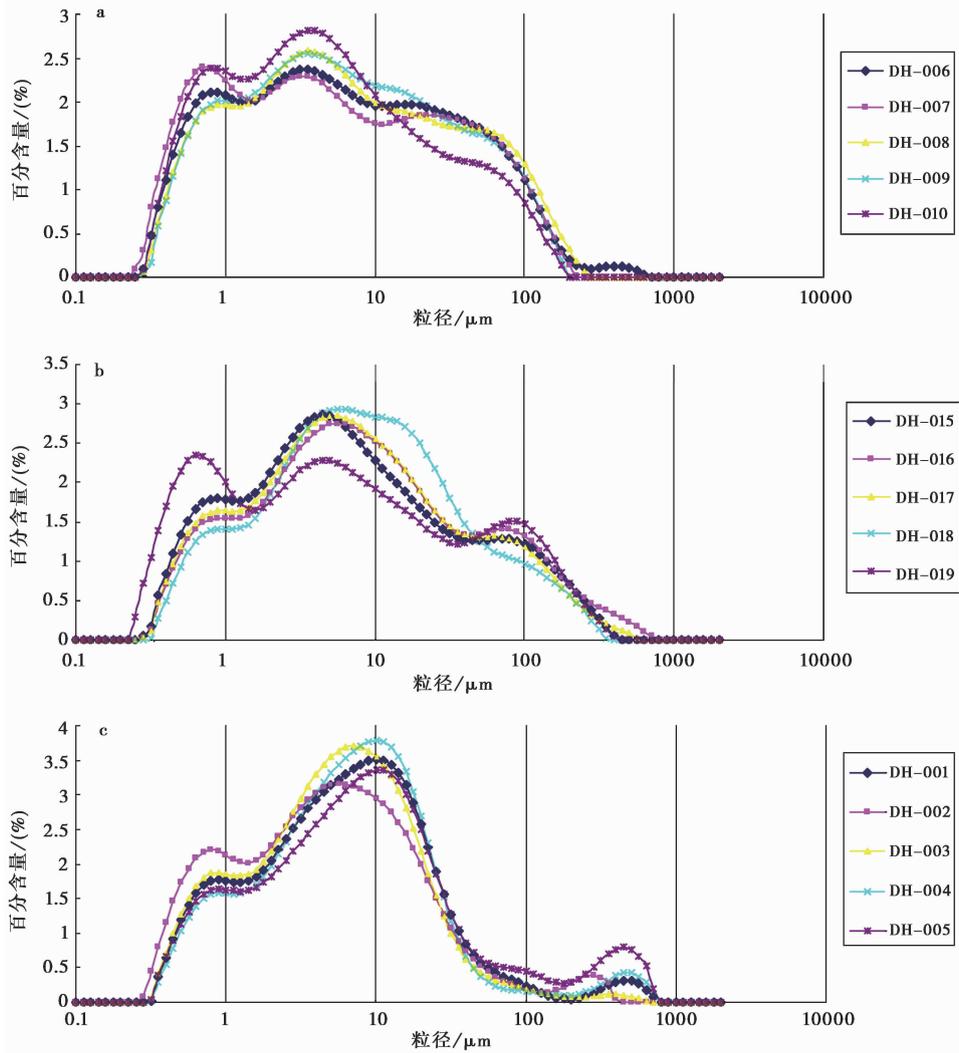


图3 德化县亭头滑坡、霞碧滑坡、石山滑坡滑动带土粒度分布图

Fig. 3 Grain size of landslides sliding zone soil of Tingtou, Xiabi and Shishan in Dehua County

a. 德化县亭头滑坡滑动带土粒度分布图; b. 德化县霞碧滑坡滑动带土粒度分布图; c. 德化县石山滑坡滑动带土粒度分布图

该地区滑坡滑带土样品粒度显示,滑动带土的粒度分布以第二组分为优势组分,粒径范围多集中在 $8 \sim 10 \mu\text{m}$,该组分的百分含量占全部的80%强,最高可达89%(图6),该类型代表了黄河上游地区第三系红黏土滑坡滑带土类型。

3.1.4 哀牢山风化壳滑坡

样品采自云南省哀牢山地区的红河县风化壳滑坡,该地区滑坡的滑带土粒度呈现三峰特征,部分样品有4个粒度组分叠加构成。所有样品第二组分($7 \sim 10 \mu\text{m}$)为优势组分,含量最高,与第三系泥岩滑坡滑带土粒度分布特征有一定类似,但又有所不同,后者第三组组分百分含量明显较前者高。四川雅安地区的昔格达地层滑坡滑带土与此有相似的粒度特征(图7)。

3.2 滑带土与滑坡堆积物的粒度多组分分布特征差异

样品分别采自黄河上游地区群科-尖扎盆地的夏藏滩滑坡、贵德盆地的席笈滩滑坡以及兰州市区的皋兰山滑坡的滑坡滑带土与滑坡堆积物上。以贵德盆地的席笈滩滑坡为例(图8),滑带土样品采自滑坡侧缘出露的滑带上,滑坡堆积物样品采自紧邻滑带的上覆滑坡堆积体上,其他两处滑坡取样方法与此相同。

由图9的滑坡粒度概率累积曲线可知,3处滑坡的滑带土与滑坡堆积物的粒度多组分分布特征存在明显差异,滑带土粒度组分分布特征均以第二组分($1 \sim 10 \mu\text{m}$)为优势组分,而滑坡堆积物的粒度组

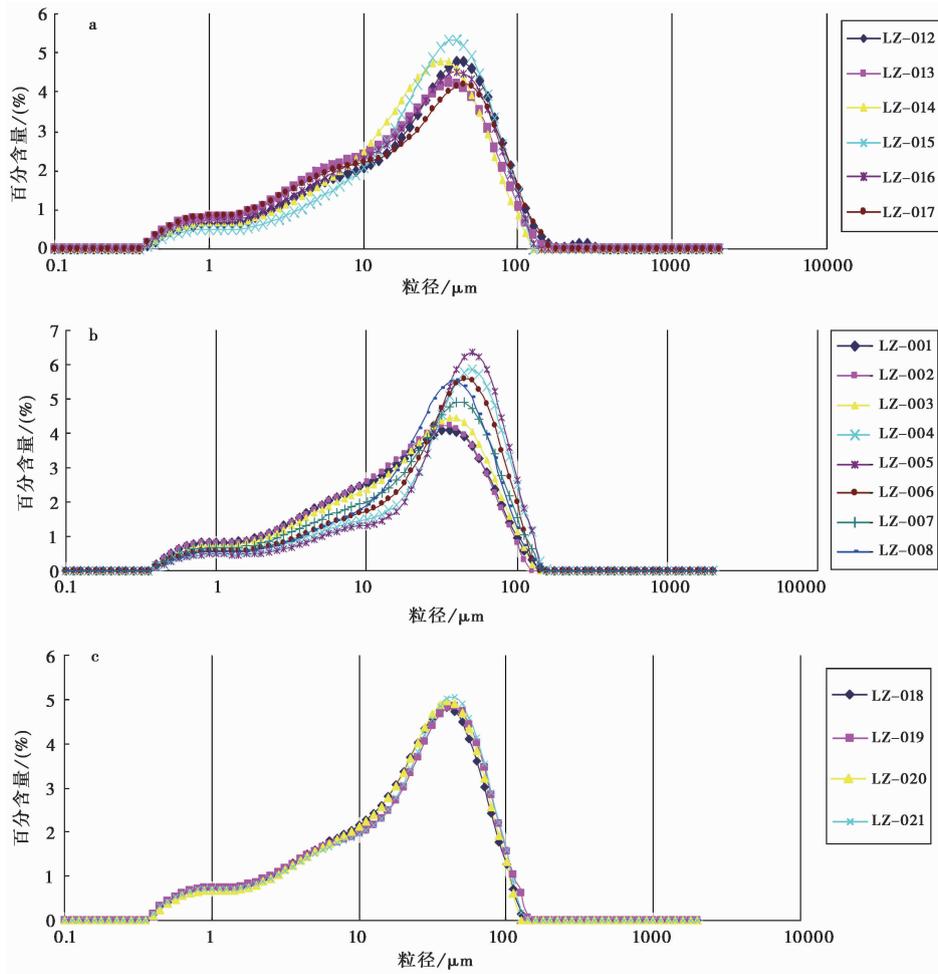


图4 兰州地区的黄土滑坡滑动带土粒径分布图

Fig. 4 Grain size of sliding zone soil of landslides in Lanzhou

a. 黑方台滑坡滑带土粒度分布图; b. 黄茨滑坡滑带土粒度分布图; c. 黄茨东滑坡滑带土粒度分布图



图5 夏藏滩滑坡 I 期滑坡滑面

Fig. 5 The sliding surface soil of Xiaozangtan landslide-I

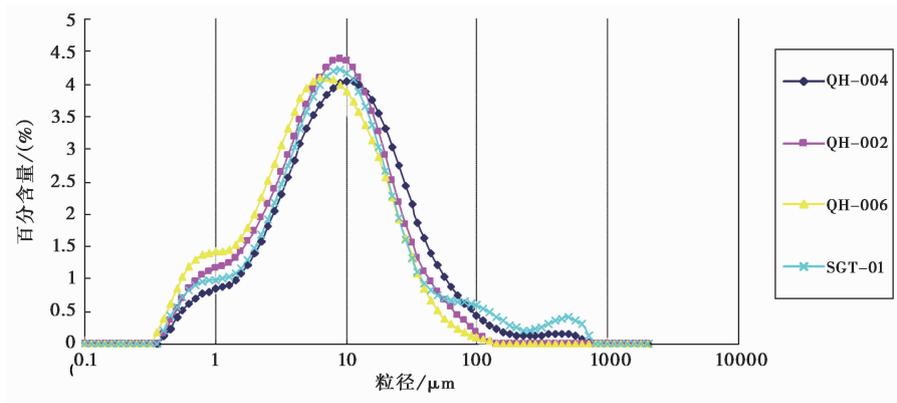


图6 黄河上游泥岩滑坡滑带土粒度分布图

Fig. 6 Grain size of sliding zone soil of landslides in the upper reaches of Yellow River

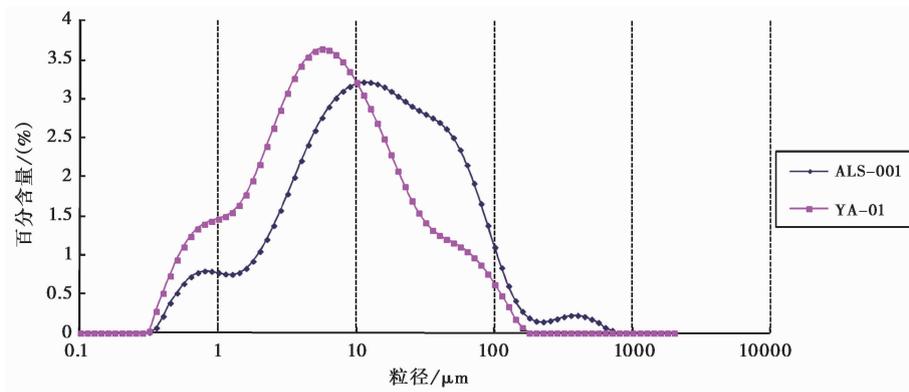


图7 哀牢山和雅安地区滑坡滑带土粒度特征

Fig. 7 Grain size of sliding zone soil of landslides in Ailaoshan and Ya'an



图8 席箕滩滑坡剖面及采样点位置

Fig. 8 The profile and samples location of Xijitan landslide

1. 滑带土采样点; 2. 滑体堆积物采样点

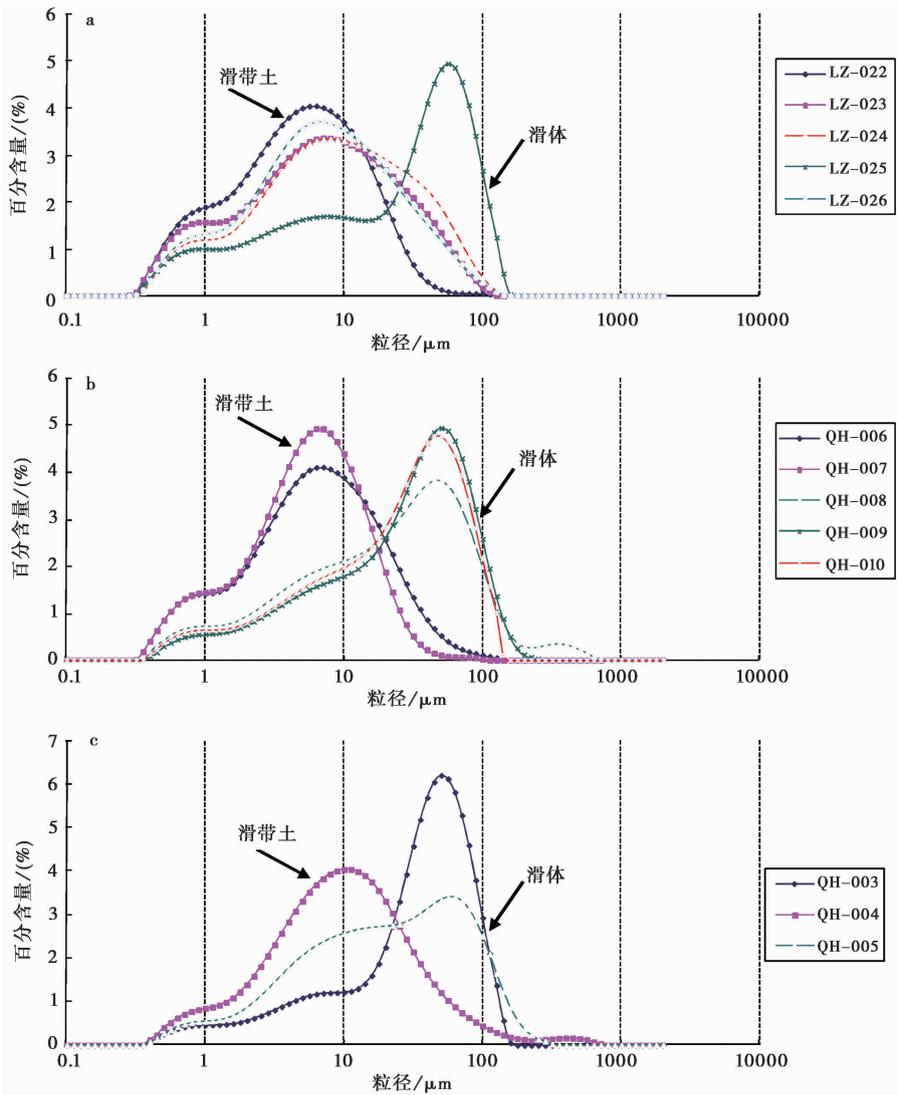


图9 不同滑坡的滑带土与滑体堆积物的粒度特征差异

Fig. 9 The grain size discrepancy of sliding zone soil and its deposit of different landslides

a. 兰州市皋兰山滑坡粒度组分分布图; b. 尖扎县夏藏滩滑坡粒度组分分布图; c. 贵德县席笈滩滑坡粒度组分分布图

分均以第3组分($50 \sim 70 \mu\text{m}$)为优势组分,滑带土粒度优势组分明显偏细于滑坡堆积物的粒度优势组分。野外实地调查发现,上述滑坡的前缘又发生了多起次一级滑坡,滑带土粒度组分中第二组分含量较高与滑坡多次活动有一定关系,主要是滑坡在滑动过程中,对滑动带土具有明显的挤压磨蚀作用造成土体孔隙度明显降低,颗粒之间的相互作用力增强,粒度组分偏细;而滑坡堆积物则在滑坡滑动的过程中没有经过良好的动力分选作用,松散而杂乱,故滑坡滑带土的粒度组分明显较周边物质偏细。

由于滑坡的活动使得滑坡滑带土的粒度组分分布特征较其他沉积物更为复杂,其独特的粒度组分分布特征的形成可能与滑坡本身的形成演化过程有关,同时反映了滑带土与滑坡堆积物不一样的工程

地质特性。

4 结论

(1) 不同沉积类型的滑坡滑带(面)土和滑坡堆积物的粒度分布特征一般含有4个组分,其分别为风成的细粒组分($<1 \mu\text{m}$)、中粒组分($1 \sim 10 \mu\text{m}$)、粗粒组分($10 \sim 100 \mu\text{m}$)和水成的悬浮组分($100 \sim 500 \mu\text{m}$)。

(2) 不同地区不同沉积类型的滑坡其滑带(面)土粒度与滑坡堆积物的粒度多组分具有不同的分布特征。

(3) 同一地区滑坡的滑带(面)土与滑坡堆积物的粒度多组分分布特征有较大差异,主要受控于滑

坡本身的形成演化过程。

参 考 文 献

- [1] 李晓, 梁收运, 郑国东. 滑带土的研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, **25**(5): 484~491.
Li Xiao, Liang Shouyun, Zheng Guodong. Progresses in sliding zone soil of landslides. *Advances in Earth Science*, 2010, **25**(5): 484~491.
- [2] 胡瑞林, 王珊珊. 滑坡滑面(带)的辩证[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 35~40.
Hu Ruilin, Wang Shanshan. Main features and identification method of sliding-surfaces in soil and rock slopes. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(1): 35~40.
- [3] 刘小丽, 邓建辉, 李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学, 2004, **25**(11): 1849~1854.
Liu Xiaoli, Deng Jianhui, Li Guangtao. Shear strength properties of slip soils of landslides: An overview. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(11): 1849~1854.
- [4] 李晓. 滑带土组成特征及其成因意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2010, 58~59.
Li Xiao. Composition Characteristics and Its Genetic Significance of Sliding Zone Soil. Lanzhou: Lanzhou University, 2010, 58~59.
- [5] 易顺民. 滑坡滑动带土的分维特征及其意义[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, **6**(2): 21~22.
Yi Shunmin. Fractal dimension features in sliding zone soils of landslide and its significance. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1995, **6**(2): 21~22.
- [6] 易顺民, 唐辉明. 西藏樟木滑坡群的分形特征及其意义[J]. 长春地质学院学报, 1996, **26**(4): 392~397.
Yi Shunmin, Tang Huiming. The fractal feature of Zhangmu landslides group in Tibet and its significance. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1996, **26**(4): 392~397.
- [7] 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, 1976. 11~45.
The Geology Team of Chengdu College of Geology. Application Analysis of Grain Size. Beijing: Geological Publishing House, 1976. 11~45.
- [8] 孙东怀, 鹿化煜, David Rea, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2001, **18**(3): 327~329.
Sun Donghuai, Lu Huayu, David Rea, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, **18**(3): 327~329.
- [9] 秦小光, 吴金水, 蔡炳贵, 等. 全新世时期北京-张家口地区与黄土高原地区风成系统的差异[J]. 第四纪研究, 2004, **24**(4): 430~436.
Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, Cai Bingui, et al. The difference between dust-transporting wind systems of Beijing-Zhangjiakou area and the loess plateau since the LGM. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(4): 430~436.
- [10] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学(D辑), 1998, **28**(3): 278~283.
Lu Huayu, an Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau. *Science in China(Series D)*, 1998, **28**(3): 278~283.
- [11] Qin Xiaoguang, Cai Bingui, Liu Tungsheng. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60000 years before present. *Journal of Geophysical research*, 2005, **110**(4): 1029.
- [12] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究[J]. 第四纪研究, 2008, **28**(2): 334~342.
Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jingshui, et al. The multimodal grain-size distribution characteristics and its formation mechanism of lake sediments. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(2): 334~342.
- [13] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. 沉积学报, 2009, **27**(2): 45~53.
Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jingshui, et al. The multimodal grain-size distribution characteristics of loess, desert, lake and river sediments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, **27**(2): 45~53.
- [14] 殷志强, 秦小光. 末次冰期以来松嫩盆地东部榆树黄土堆积及其环境意义[J]. 中国地质, 2010, **37**(1): 212~222.
Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang. Environmental significance and characteristics of grain size of the loess in east Song-Nen basin during the last glacial period. *Geology in China*, 2010, **37**(1): 212~222.
- [15] 殷志强, 秦小光, 李玉梅, 等. 源区距离对黄土粒度多组分分布特征的影响[J]. 中国地质, 2008, **35**(5): 1037~1044.
Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Li Yumei, et al. Influence of the dust source distance on the multimodal grain-size distribution characteristics of loess. *Geology in China*, 2008, **35**(5): 1037~1044.
- [16] 晏鄂川, 刘汉超, 唐辉明. 滑带土动力学性质试验研究[J]. 工程地质学报, 2003, **11**(3): 318~321.
Yan Echuan, Liu Hanchao, Tang Huiming. Experimental study on the dynamic properties of soil in slide zone of landslide. *Journal of Engineering Geology*, 2003, **11**(3): 318~321.
- [17] 殷志强, 程国明, 胡贵寿, 等. 晚更新世以来黄河上游巨型滑坡特征及形成机理初步研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 41~52.
Yin Zhiqiang, Cheng Guoming, Hu Guishou, et al. Preliminary study on characteristic and mechanism of super large landslides in the upper Yellow river since late Pleistocene. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(1): 41~52.