

持续强降雨对黄土地区滑坡地质灾害的影响 ——以延安地区为例

王滔,赵学理,齐普荣

(陕西核工业工程勘察院,西安 710054)

摘要:2013年7月,延安市发生了自1945年有气象记录以来,强度最大、持续时日最长且间隔时间最短的强降雨。在此过程中,区内沟壑斜坡发育大量的滑坡地质灾害。通过野外调查和典型重大滑坡地质灾害隐患点工程地质勘查,分析了滑坡体形成原因和影响因素。结果显示:坡度角大于 28° 、坡体形态为阶梯型和复合型、有第四系坡积黄土堆积的斜坡在持续强降雨作用下产生滑坡地质灾害的概率高,同时当降雨量大于100 mm、土体浸湿深度大于55 cm时,产生坡面泥石流灾害的可能性大。因此,黄土地区(延安)新建工程应避免在坡度陡、坡形复杂、坡积黄土较厚的斜坡危害区内选址,在降雨期间应密切监测降雨量,及时撤离疏散易发区内群众。

关键词:滑坡;第四系;坡积黄土;稳定性系数;未压密饱和黄土;泥石流

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2014)03-0224-06

2013年7月1至26日,延安地区遭受“百年一遇”持续强降雨侵袭,境内地质灾害急剧增加,呈面状发育,其中发育沟谷斜坡区内的滑坡地质灾害数量最多,产生的破坏最大,新产生的滑坡体具有显著的独有特征。本文通过对此次强降雨过程中滑坡体的调查和研究,总结出黄土地区滑坡地质灾害的特征,并浅析其成因。

1 灾害概况

经调查证实,延安市遭受此次强降雨,雨量240~300 mm的有3个县,301~400 mm的4个县,401~500 mm的3个县,超过500 mm的3个县区,延川县最高达到607.7 mm,是常年全年降水量的一倍以上。强降雨导致全市13个县区的158个乡镇、街道办、中心社区受灾,滑塌地段7594处,倒塌房屋2.69万间,受灾人口93.6万人次,因灾造成死亡42人,受伤133人。

2 滑坡特征

2.1 发育地段

区内滑坡地质灾害发育最为广泛,灾害体呈面状沿沟谷斜坡和黄土梁峁边缘斜坡发育。根据调查

和统计,滑坡体主要出现在陡坡内,产生于大于 30° 斜坡内的滑坡体占总数的90%以上,当坡度大于 60° 时,斜坡产生滑坡灾害的概率最高。根据滑坡体所在斜坡的坡型分析,绝大多数滑坡体位于阶梯型和复合型斜坡内^[1],发生滑坡的部位主要位于斜坡中下部和坡型转折部地段。从斜坡横向形态分析,坡体内冲沟发育密度高,坡缘呈波浪形或串珠状的斜坡滑坡发育数量较少。

2.2 成因分析

2.2.1 坡度与滑坡体的形成关系分析

斜坡的坡度决定了斜坡内应力的分布,在斜坡形成过程中,由于侧向临空面的产生,临空面表层土体卸荷回弹,引起应力重分布、应力分异和应力集中等效应,其结果是愈接近坡面,最大主应力迹线愈与之平行,在坡脚产生最大剪应力增高带,在坡肩形成拉应力区,出现拉裂破坏^[2]。根据建筑边坡工程技术规范,土质边坡的稳定性采取圆弧滑动法进行计算,用安全系数评定坡体的稳定性,计算模型见图1,计算公式如下:

$$K_s = \frac{\sum R_i}{\sum T_i}$$

式中: K_s 为滑坡稳定系数; R 为滑弧半径; $\sum R_i$

收稿日期:2014-03-28

资助项目:延安市临时应急公益救援性调查项目;2013年延安市强降雨引发地质灾害应急调查项目

作者简介:王滔(1981-),男,大学本科,岩土工程师,2006年毕业于河北工程大学 勘察技术与工程专业,现从事岩土工程相关工作,E-mail: wangtao113@163.com。

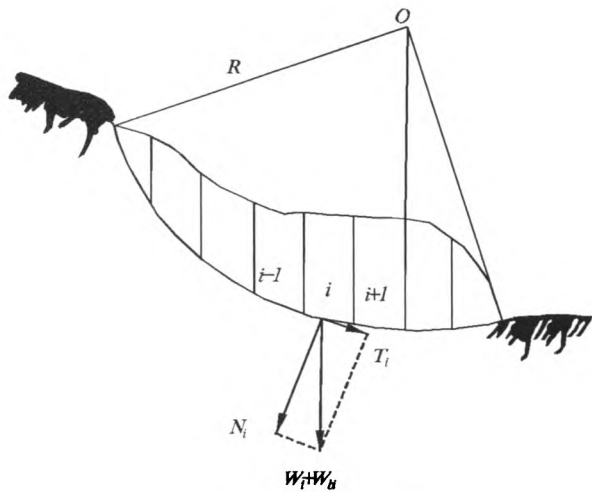


图1 边坡稳定性计算模型

Fig.1 Slope stability calculation model

为各滑块沿圆弧滑面的抗滑力; $\sum T_i$ 为各条块沿圆弧面的滑动力。

$$R_i = N_i \cdot \tan \varphi_i + C_i \cdot L_i$$

$$N_i = (W_i + W_{bi}) \cos \alpha_i$$

$$T_i = (W_i + W_{bi}) \sin \alpha_i$$

式中: C_i 为第*i*计算条块黏聚力标准值(kPa); φ_i 为第*i*计算条块摩擦角标准值($^{\circ}$); L_i 为第*i*计算条块的滑面长度(m); α_i 为第*i*计算条块的倾角($^{\circ}$);

W_i 、 W_{bi} 为第*i*计算条块单位宽度岩土体自重(kN / m); R_i 为第*i*计算条块上的抗滑力(kN / m)。

根据本地区的区域黄土地层结构,取均质的上更新统(Q_3)黄土在暴雨工况下的平均力学指标为计算参数,其中 $C:22 \text{ kPa}$ 、 $\varphi:19.2^{\circ}$,饱和重度为 18.8 kN/m^3 ,对不同坡度边坡的稳定性进行定量计算。根据本次调查的延安地区滑坡体长度统计结果,以坡高50 m为例,分别计算坡度20~70°坡体的稳定性系数,计算模型如图2,计算结果见图3。由计算图可以看出,当坡度大于33°时,斜坡潜在剪出口位于坡脚线以上,会产生一定的附加势能,破坏力较强;从图3可看出,28°时斜坡稳定性系数为1,处于极限平衡状态,斜坡稳定性系数随坡度衰减快。23°时,斜坡稳定性系数为1.15,23°以下斜坡为稳定状态。同时45°以上斜坡,斜坡稳定性随坡度增加而减小的幅度小于45°以下,表明该坡度以内坡体主应力迹线趋于平行^[3],内部剪切破裂面偏移幅度小。因此,当斜坡坡度大于28°,尤其是大于33°时,斜坡产生滑坡灾害的概率大、危害性强。

2.2.2 坡体形态与滑坡体的形成关系分析

在更新世黄土堆积晚期,黄土地区的侵蚀作用比堆积作用强烈。在侵蚀与堆积的共同作用下形成

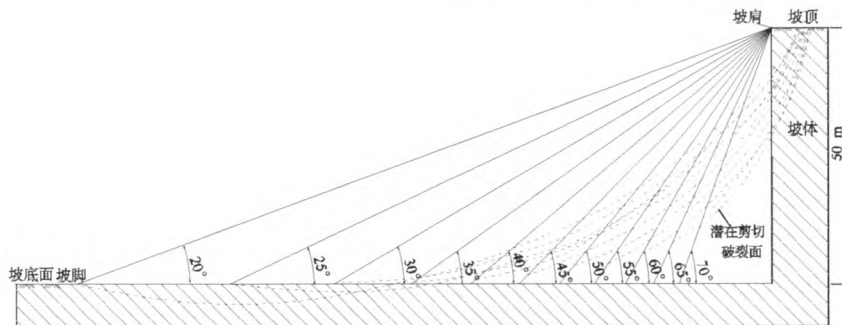


图2 不同斜坡坡度计算模型

Fig.2 Different slope gradient calculation model

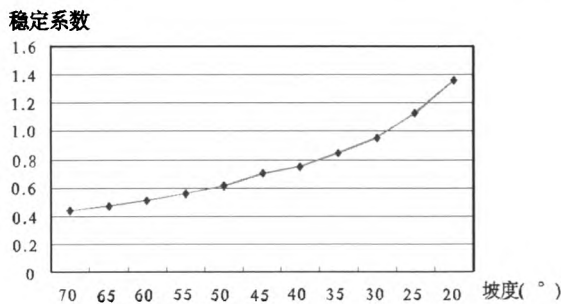


图3 稳定性系数与坡度关系图

Fig.3 Coefficient and slope stability diagram

了现代的黄土高原地貌,具有沟壑纵横,地形破碎的特点。延安地区黄土地貌属于典型的继承型和继承、侵蚀混合型黄土梁峁沟壑区。由于水流侵蚀作用,在现代地貌中沟壑为黄土地区特有的地貌现象,伴随着河流水系的长期侵蚀,沟谷的形态和发育程度也会经历一个长期的变化过程,由细沟-浅沟-切沟-悬沟-冲沟-坳沟-河沟,谷坡的形态反映出沟谷的侵蚀历程。谷坡在经历了长期侵蚀破坏后呈现不同的形态特征,坡体形态呈直线型和凹型的

谷坡反映出河流目前处于幼年和壮年期,谷底水流侧向侵蚀严重,水流的搬运和冲刷能力强,坡肩明显,谷坡垮塌后,垮塌体直接被洪水携带搬运,谷坡表面其实为滑塌界面,属于河谷拓宽侵蚀期^[1]。凸型、阶梯型和复合型谷坡反映出壮年期和老年期河流在流水对沟岸侵蚀能力下降的过程中,斜坡由于自身重力作用所塑造的形态,斜坡内分布有一个或多个陡坎,坡肩不明显,坡体剖面有明显起伏,其中凸出部位多为全新世或更新世滑塌堆积物,结构松散破碎,物理力学性质相对较差,易于变形和复活,

在本次延安市持续强降雨过程中,此类斜坡产生的滑坡占滑坡总数的70%以上(图4)。

2.2.3 坡内沟谷与滑坡体的形成关系分析

梁峁区边缘斜坡内,由于发育有细沟和浅沟,在梁峁边缘坡肩处常形成悬沟,沟谷纵向切割斜坡^[1],将梁峁边缘黄土陡壁切割成多个与斜坡连为一体的黄土柱,使得坡缘呈现出波浪形状,该类斜坡中滑坡地质灾害发育相对较少,但剥离式小规模掉块现象较多(图5)。该类斜坡内滑坡地质灾害发育少的原因主要是由于悬沟的存在,减少了斜坡上部地表水

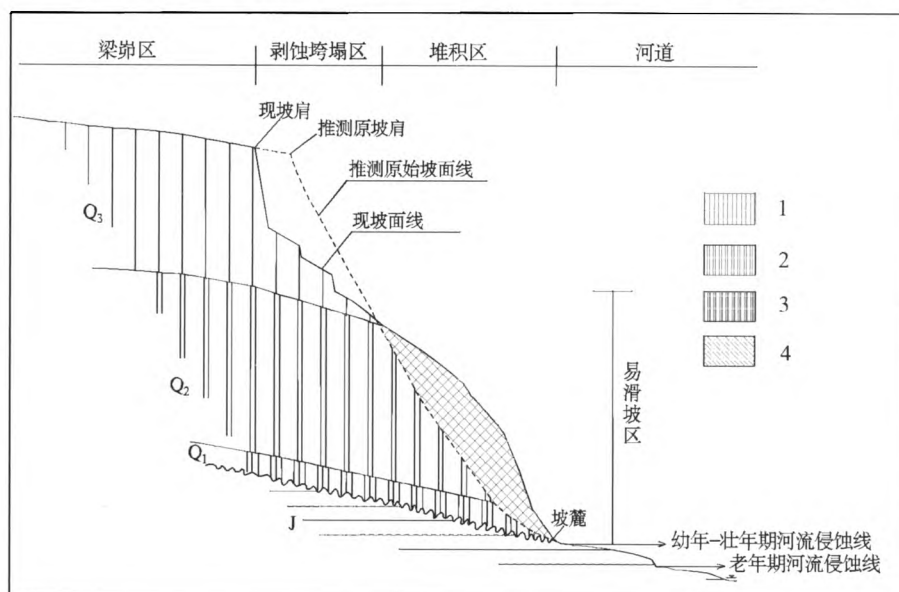


图4 河谷区谷坡侵蚀模型

Fig.4 Valley District valley slope erosion model

1. 上更新统黄土; 2. 中更新统黄土; 3. 下更新统黄土; 4. 基岩

的大面积汇聚,斜坡内地下水压力小,坡面覆盖的早期坡积黄土少,同时圆弧形悬沟减少了坡体横向的应力集中,沟壁周围应力得到有效释放,且应力分布较均匀,因此产生滑坡的数量少,可以作为研究黄土滑坡治理的方向。

3 滑坡结构特征

调查和灾后滑坡地质灾害勘查发现,在本次持续强降雨过程中,区内新产生的滑坡地质灾害体厚度1~5 m,其中厚度1~3 m的滑坡体占滑坡体总数的45%以上,在浅沟内以“剥皮式”滑动破坏为主,呈推移式运动破坏形式^[3],滑动距离较远,将表层含有大量草根的土体整体滑入沟道内,沟底形成光滑的滑移面。

根据滑坡体组成物质统计,区内厚度>1 m、有完

整滑移面的滑坡体中(除人工填土滑坡),滑体物质为Q₃黄土的滑坡体占70%以上,滑面以土体内部剪



图5 悬沟(切沟)发育的斜坡形态

Fig.5 Ramp shape hanging ditch (gully) development

切破裂面和坡积体堆积面为主。根据分析,滑体物质具有 Q_3 黄土的组成结构,但其物理力学性质却与 Q_3 黄土有一定的区别。滑坡土体颜色以浅黄或灰黄色为主,土体遇降雨饱和后呈深灰色或灰褐色。土体的物理力学性质较梁峁内 Q_3 黄土低,是区内新增滑坡体的主体组成物质。

根据相关资料^[4],典型的黄土地层结构见图6, Q_3 黄土是梁峁区上部的主要组成物质^[5],整个斜坡由更新统多个地层岩土体组成,呈近似水平状堆积,斜坡

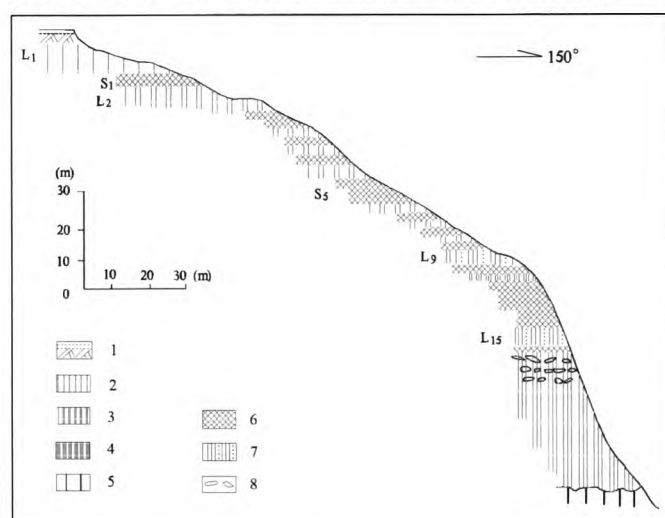


图6 典型黄土结构

Fig.6 Typical loess structure

- 1.Q4黑垆土; 2.Q3黄土; 3.Q2黄土; 4.Q1黄土; 5.N2红粘土;
6.古土壤; 7.砂质黄土; 8.钙质结核

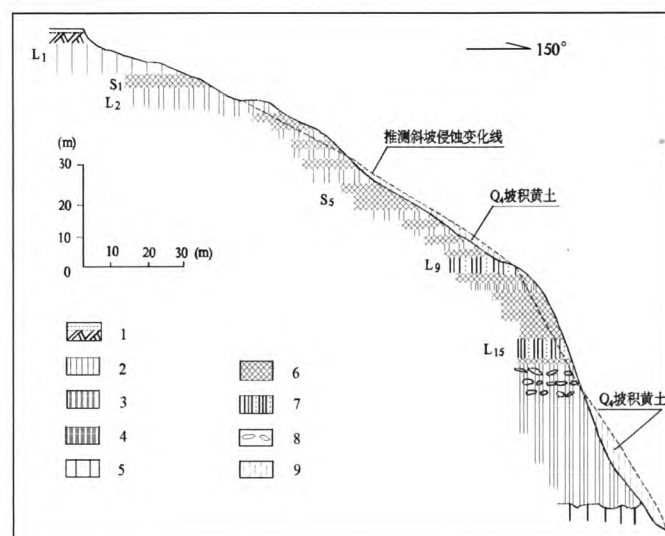


图7 有坡积黄土的斜坡结构

Fig.7 Talus slope loess structure

- 1.Q4黑垆土; 2.Q3黄土; 3.Q2黄土; 4.Q1黄土; 5.N2红粘土;
6.古土壤; 7.砂质黄土; 8.钙质结核; 9.Q4坡积黄土

稳定性相对较好。但自更新统以来,斜坡在经历了流水、地震和地球内外部动力的作用下,大部分斜坡坡面不再是多套完整地层的水平出露区,而是覆盖长期风化剥蚀、滑塌的堆积物^[6],其中堆积以上更新统和全新统为主,土体颜色不均,不具有明显的节理构造,均匀性差,孔隙等发育不规律(图7)。根据成因,该类土体属第四系坡积黄土,其外部特征较接近 Q_3 黄土,但物理力学性质比 Q_3 黄土差,见表1。

由表1可见,第四系坡积黄土力学性质比 Q_3 黄土差,在降雨过程中坡积体易于产生滑坡地质灾害。该类滑坡具有滑体厚度小,分布广等特点。

4 滑坡特征与降雨量的关系

降雨是本次滑坡形成最主要的影响因素之一。黄土高原土质疏松,降雨在短时间内汇集,形成具有较强侵蚀能力的地表水流,在沟谷地区冲刷破坏坡脚,导致谷坡滑塌失稳^[7]。同时地表水沿黄土裂隙入渗,在裂隙面形成水压力和潜蚀作用,产生落水洞、地下陷穴等现象,破坏坡体结构,在古土壤或基岩面之上形成局部上层滞水,甚至潜水,改变坡体应力状态,最终导致斜坡失稳^[8]。

根据调查研究对比,本次持续强降雨过程中,延安地区新产生的滑坡地质灾害与以往滑坡地质灾害有不同的发育特征和结构特征。根据调查,近年来(2013年7月以前)延安地区滑坡的形成除降雨因素外,主要与人类活动、地震、冻融等因素有关^[9],滑坡体呈单点式分布,滑体厚度一般较大,而本次持续强降雨过程中,区内滑坡体呈面状发育,但滑体厚度普遍较小,滑移后多呈流体状位移^[10],导致区内出现大面积剥皮流泥现象,俗称“鬼剃头”^[11]。

通过将滑坡形成时间、发育数量、破坏特征与降雨量进行对比,反映出降雨量对滑坡形成规律和发育特征的控制性关系^[10]。以延川县为例,自2013年7月8日开始至7月16日,在9天的时间里,降雨基本没有长时间停止过,因此将该段时间视为持续降雨时间段。在前4天,降雨量30~70 mm,平均降雨量50 mm,土体累计浸湿深度0.55 m,土体含水量增加,饱和度40%~60%,产生增湿变形,坡体内出现湿陷裂缝,陡坡地段出现土体散落现象,局部出现小规模滑坡。12日,最大降雨量达154.9 mm,土体饱和度80%以上,形成

未压密饱和黄土^[2],土体重度达到最大的饱和重度,土体有效抗剪强度急剧降低^[3],地表水沿裂缝入渗至土体内,在地下水压力的作用下,土体沿滑面滑移破坏,滑体在运动过程中土体结构破坏,土粒和孔隙分离,颗粒间胶结作用降低,地表水和地下水混合并充填在孔隙中产生浮力,骨架颗粒悬浮在水土混合体中产生流动,形成流泥现象,或称为坡面型流泥。这

种现象在区内大面积存在,根据斜坡土体结构和斜坡特征规模不等,在坡面陡立直顺,第四系坡积黄土少的斜坡内以表层受雨水浸泡的土体产生软化掉泥为主要破坏形式。在有松散第四系坡积黄土的斜坡内,以较大体积的泥流和滑坡为主要破坏形式,危害较大。本时段持续强降雨,降雨量与坡体变形的关系见表2。

表1 Q3黄土和第四系坡积黄土物理力学性质对比表

Table 1 Physical and mechanical properties comparison between Q3 loess and Q4 loess slope deposits

土体	含水率 ω %	重度 γ kN/m ³	干重度 γ _d kN/m ³	孔隙 比e	饱和度 Sr %	液限 w _L %	塑限 w _P %	塑性 指数 I _p %	液性 指数 IL	压缩系 数 a ₁₋₂ (MPa ⁻¹)	湿陷 系数 δ	天然强度		饱和强度	
												内聚力C (kPa)	内摩擦 角 φ	内聚力 C(kPa)	内摩擦角 φ (°)
Q3黄土	12.72	15.9	14.1	0.94	38.86	27.13	17.15	9.89	0.29	0.19	0.075	33.54	24.1	23.67	20.58
坡积黄土	19.40	15.07	12.67	1.11	46.17	30.77	18.47	12.3	0.62	0.31	0.03	23.0	18.7	19.40	15.07

表2 降雨量与坡体变形的关系

Table 2 Relationship between the rainfall and the slope deformation

时间	降雨强度(mm/h)	土体浸湿深度(m)	变形特征
7月8日	1.96	0.19	局部掉块,小规模不连续裂缝
7月9日	2.29	0.33	局部掉块,裂缝加宽
7月10日	1.62	0.42	裂缝出现垂直位移差,开始贯通
7月11日	2.85	0.55	出现滑坡,为沿滑面整体滑移,冲沟内有明水
7月12日	6.45	0.73	出现大面积坡面流泥,狭窄支沟内出现泥流

5 结论

由于陕北地区大部分时间干旱少雨,在遭遇罕见的持续强降雨过程中,土体出现湿陷变形,抗剪强度降低,斜坡产生滑坡地质灾害的概率高,危险性大。尤其是在坡度大于28°、坡型为阶梯型和复合型,斜坡表层有第四系坡积黄土堆积的斜坡内,滑坡地质灾害易发程度高,是地质灾害重点防治区域。当日降雨量大于100 mm时,需预防坡面流泥和狭窄沟谷内产生泥流灾害,尽早采取预警防灾措施。

参考文献:

[1] 张茂省,校培喜,魏兴丽,等.陕西省延安市宝塔区地质灾害详细调查报告[R].中国地质调查局西安地质调查中心,2006,52-123.
[2] 《工程地质编委会》.工程地质手册[M],北京:中国建筑工业出版社,2006,413-448.

[3] 晏同珍.滑坡学[M],武汉:中国地质大学出版社,2000,52-75.
[4] 甘枝茂.黄土高原地貌与土壤侵蚀研究[M],西安:陕西人民出版社,1990,51-90.
[5] 谷栓成,于远祥.黄土滑坡灾害形成机理及其防治对策[J].中国矿业,2008,17(3):44-47.
[6] 黄文辉.环境地质学[M].北京:石油工业出版社,2011,120-155.
[7] 张亚国.延安地区降雨诱发的黄土滑坡形成机理研究[R].长安大学,2012,33-58.
[8] 尚慧,倪万魁,杜光波,等.黄土滑坡形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(2):26-32.
[9] 陈永明,石玉成,刘红梅,等.黄土地区地震滑坡的分布特征及其影响因素分析[J].中国地震,2005,21(2):235-243.
[10] 张茂省,李同录.黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J].工程地质学报,2011,19(4):530-540.
[11] 陕西省地质矿产局.陕西省区域地质志[M].北京:地质出版社,1989,135-154.

Impact of Continued Heavy Rainfall on Loess Land Slide Hazard Areas: A Case Study on Yan'an

WANG Tao, ZHAO Xue-li, QI Pu-rong

(Shaanxi Nuclear Industry Engineering Investigation Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: On July 2013, Yan'an district has happened a heavy continuous rainfall which was maximum intensity, longest duration and shortest interval since 1945 meteorological records. In this process, a lot of landslide geological hazards occurred in the gully slope region. Through the field investigation and geological investigation of the great and typical landslide geological hazards, landslide genesis and influencing factors were analyzed. The results show that if the angle of slope is more than 28° , the slope shape is the ladder-type or compound-type, and the slope is composed with quaternary alluvial loess plateau, the landslide geological hazard happens with a higher probability. And simultaneously when rainfall is greater than 100 mm and soil soak depths is greater than 55 cm, there would be a higher probability of the debris flow on slope. Therefore, the new project in loess area (Yan'an) should be avoided the slope which have a steep gradient, a slope deformation complex and relatively thickness alluvial loess plateau. During rainfall time, precipitation should be strict monitored, and evacuate people who are in geologic disaster occurrence district in time.

Key words: landslide; Quaternary; alluvial loess plateau; stability coefficient; uncompaction saturated loess; mud-flow

Geological Characters and Resources Potential in the Kibaran Belt, Central Africa

HE Sheng-fei, LIU Xiao-yang, WANG Jie, SUN Kai, REN Jun-ping

(Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Mesoproterozoic Kibaran belt is composed of three distinct stratigraphic units, they are quartzites, metapelitic rocks and intrusive granitic rocks. Complete cycle of intra-continent rift magmatic evolution can be found in Kibaran, we propose the following. First of all, the crustal extension to receive deposits, at the same time, the lithospheric thinning and the asthenosphere upwelling, result in mafic-ultramafic magma invaded into upper crust and formed the bimodal magmatic rocks. After this, the collision orogeny make the sediments folded and formed mountain, and then, magma invaded in the core of anticline. Then the hydrothermal ore-bearing liquids rose following the channel which formed at the tectonic event before, and deposited in the contact zone between the granite and basement or come from Mesoproterozoic to early Neoproterozoic. The mafic-ultramafic rocks in the Kibaran belt is very famous in Cu-Ni mineralization, and also have great potential of PGE-Au mineralization. Cassiterite-granite is a very important kind of ore-bearing granites, and the pegmatites are well known for their Sn-W-Au, Nb-Ta, Li, Be mineralization. Gold usually can be found in tectonic breccia type of fracture zones, and it is very close to cassiterite granite in genetic.

Key words: Kibaran belt; geological character; resources potential; Sn-W-Au; Cu-Ni