

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0081

冯倩倩,王运生,罗越,等.汶川县雁洛大型堆积体特征及成因[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):141-148. FENG Q Q, WANG Y S, LUO Y, et al. Characteristics and mechanism of Yanluo giant deposit in Wenchuan County[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 141-148. (in Chinese)

汶川县雁洛大型堆积体特征及成因

冯倩倩¹,王运生¹,罗越¹,刘江伟¹,明伟庭¹,郭凤双^{1,2}

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059;
2. 四川航天职业技术学院 管理工程系,四川 广汉 618300)

摘要:基于详细的野外调查,对汶川县雁门乡雁洛村发育的大型堆积体的基本特征、形成及演化过程进行较深入研究,结果表明:雁洛堆积体为残坡积、崩坡积、类黄土堆积以及滑坡堆积等4部分组成的复合堆积,平面上可分2个大区、6个次级区;结合侧缘基岩变形迹象以及 UDEC 数值模拟对滑坡的形成机制进行分析,其变形破坏模式为弯曲-拉裂模式;雁洛堆积体演化经历早更新世宽谷期黄土堆积阶段,中、晚更新世峡谷期谷坡卸荷变形阶段,峡谷区滑坡形成阶段,全新世堆积体复活变形阶段等4个阶段。

关键词:雁洛堆积体;物质组成;成因;倾倒变形;演化过程

中图分类号:TV1;P642.22

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Characteristics and mechanism of Yanluo giant deposit in Wenchuan County

FENG Qianqian¹, WANG Yunsheng¹, LUO Yue¹, LIU Jiangwei¹, MING Weiting¹, GUO Fengshuang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Department of Management and Engineering, Sichuan Aerospace Polytechnic, Guanghan 618300, China)

Abstract: The basic characteristics, formation, and evolution process of the large-scale accumulations developed in Yanluo village, Yanmen township, Wenchuan County are studied based on detail field investigations. The results show that: Yanluo deposit is a complex origin deposit that made up of residual and slope deposit, colluvium, loess-like and landslide deposit, and it can be divided into two zones and six sub-zones; the failure modes of the evolution process of Yanluo deposit are "bend-crack" which is simulated by UDEC software; the 4 evolution phases of Yanluo deposit may be summarized as loess accumulation stage in early Pleistocene, unloading and deformation stage in middle-late Pleistocene, landslide formation stage, deposit reactivated and deformation stage in Holocene, respectively.

Key words: Yanluo giant deposit; deposit composition; mechanism; toppling deformation; evolution process

川西北深切峡谷区频发的重大地质灾害一直以来是工程地质界研究的热点,重大地质灾害的发生除峡谷地貌提供临空条件外,高烈度以及谷坡地质

结构也是关键控制因素^[1-5]。新生代以来,受印度洋板块与欧亚板块的挤压碰撞,于青藏高原东缘形成岷山-龙门山构造带,许多学者对其地貌响应过

收稿日期:2019-05-11 修回日期:2019-11-15 网络出版时间:2019-12-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191219.1457.006.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1501000);国家自然科学基金(41877235);国家创新研究群体科学基金(41521002);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题基金(SKLGP2015Z001)

作者简介:冯倩倩(1993—),女,重庆大足人,主要从事地质灾害及区域构造稳定性研究。E-mail:304403299@qq.com

通信作者:王运生(1960—),男,四川成都人,教授,博士生导师,主要从事工程地质及区域构造稳定性研究。E-mail:wangys60@163.com

程^[6-7]及断裂活动特征^[8-10]进行研究。山脉的隆升过程影响着岷江河谷的演化进程,受茂汶断裂的影响,岷江汶川-茂县段左岸形成大量的陡倾顺层边坡。王士天等^[11]研究揭示顺层边坡的倾倒变形现象;施裕兵等^[12]对倾倒现象进行力学分析;任光明等^[13-14]结合数值模拟对倾倒形成条件、变形特征及过程进行了研究。青藏高原的差异隆升不仅导致了整个地貌的巨变,还引发了一系列显著的气候环境效应,于川西高原披覆广泛的黄土沉积,相关学者^[15-17]对黄土的地层序列、沉积时序及古气候意义进行分析,认为甘孜黄土为冰缘风成黄土,形成于 1.15MaB. P. 以来。近年来,在陡缓交界的坡折部位存在早期类黄土堆积的斜坡发生多起滑坡事件,如茂县黑虎乡滑坡、涪门乡小寨滑坡、拴马槽滑坡等,引起业内广泛关注。

雁门沟距汶川县城正北方向 3.5 km,地处岷江左岸,为高山峡谷地貌,沟谷高程 1 800 m 附近堆积有类黄土,近年来强降雨与复杂的谷坡地质结构耦合导致沟内滑坡、泥石流灾害频发。雁门沟右岸雁洛村斜坡上发育的巨型堆积体,其堆积类型、形成时序及演化过程在川西北峡谷区,尤其是在岷江(汶川-茂县段)左岸大型堆积体中具有代表性,因此研究其堆积特征、分析其形成演化过程具有重要的理论及现实意义。本文基于详细的野外调查及露头编录,对堆积体的物质组成、形成次序以及后期的复活变形进行了详细研究,揭示了整个堆积体的形成发育过程。

1 环境地质条件

雁洛堆积体位于四川省汶川县雁门沟境内,地理坐标 31°28′49.57″N,103°37′42.82″E,属于川西北地区典型的高山峡谷地貌类型,沟内河流切割作用强烈,地形起伏较大,海拔 1 352~4 632 m,谷底与山顶高差达 3 000 余米。雁门乡年降雨量小于 600 mm,雨季为 6—8 月,雁门沟内为常年性流水且水动力较强,枯水期流量为 1.1 m³/s,河流总体流向北西,过麦地村后折向北流,流经堆积体前缘后转向北西。根据流向及谷底宽度,以麦地村为界将雁门沟分为内沟和外沟,内沟段谷底十分狭窄,而外沟段相对开阔,为地质灾害集中发育区。集中性降雨及特殊的地形条件为雁门沟内地质灾害的发生提供了重要条件。雁洛堆积体发育于外沟段右岸,距雁门沟沟口约 1.3 km,现场测量斜坡自然坡度约 30°,坡向 285°。

研究区构造上位置处于印度、扬子、华北板块汇聚形成的川西北三角形断块东部,岷山、龙门山造山

带结合部位。新生代以来的构造抬升使该地区处于长期剥露期^[7],在堆积体斜坡后缘及侧缘出露泥盆系月里寨群上组(Dy1²)灰色、灰黑色薄层-极薄层千枚岩夹薄-中层状结晶灰岩。雁门乡位于龙门山后山断裂(茂汶断裂(F1))下盘,该断裂由一系列倾向 NW 的叠瓦状逆冲断层组成,主断层从雁洛堆积体北西侧经过,距堆积体前缘仅 400 m(图 1)。雁洛堆积体位于两条高角度逆冲断层(F1、f1)形成的断片上,受断层挤压作用,岩层倾角较陡,层内揉皱发育,为弱-中风化。基岩中结晶灰岩发育 3 组节理,节理 L₁:产状 15°∠62°,延伸较好;节理 L₂:178°∠30°,延伸较差;节理 L₃:162°∠61°,延伸较好。

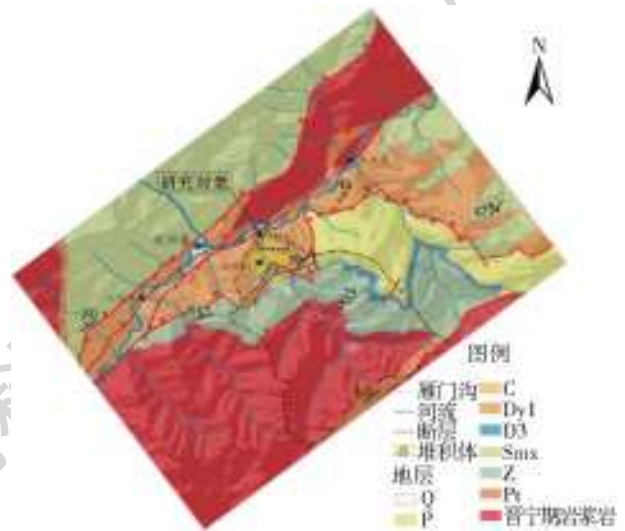


图 1 雁洛堆积体地质图

Fig. 1 Geological map of Yanluo accumulation

茂汶断裂为晚更新世-全新世以来的活动断裂,也是龙门山后山断裂中活动性最强的断裂,自 1957 年有地震历史记录以来,沿断裂带共发生 4 级以上地震 3 次,最大震级 6.5 级。2008 年汶川地震,雁门乡距震中映秀镇约 50 km,地震烈度达到 XI 度。据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)可知,雁门乡峰值加速度 0.20 g,反应谱特征周期为 0.40 s。

2 堆积体基本特征

2.1 形态特征

现场依据基岩的出露情况以及地形地貌对堆积体范围进行圈定,见图 2。堆积体后缘以高程 1 980 m 处近直立的薄层状结晶灰岩为界,前缘至河岸处,垂直高差达 560 m。上游边界以基岩出露为界,下游边界以冲沟为界,沟内为季节性流水。堆积体纵向最大长度约 1 190 m,平均宽度约 312 m,整体呈长条状,其平均厚度约 25 m,面积为 38 万 m²,估算总

方量为 950 万 m^3 。

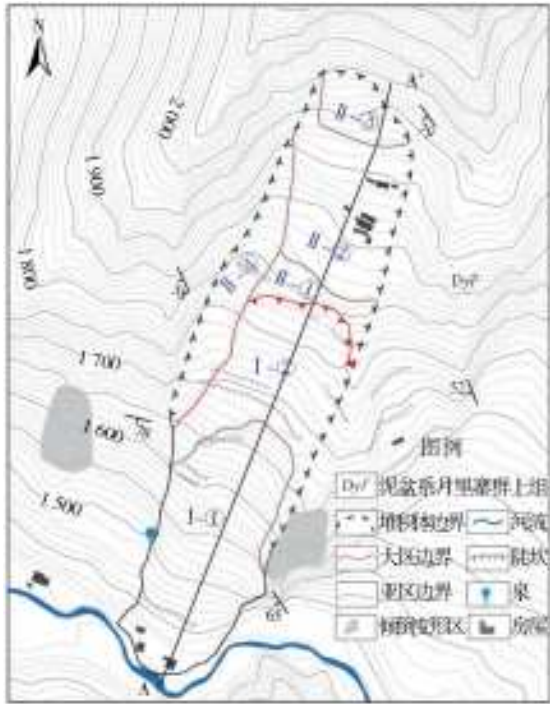


图 2 雁洛堆积体工程地质图

Fig. 2 The Engineering geological map of the Yanluo accumulation

2.2 堆积特征

斜坡 A-A' 剖面见图 3, 斜坡上堆积体主要由类黄土(又称黄土状土)及块碎石土组成, 类黄土集中出露于高程 1 800 m 以上, 并于该处发生明显变形。根据堆积体组成, 将堆积体分为滑坡堆积区(I)以及高位斜坡复合堆积区(II)2 个大区, 各区根据特征差异可以进一步划分亚区。

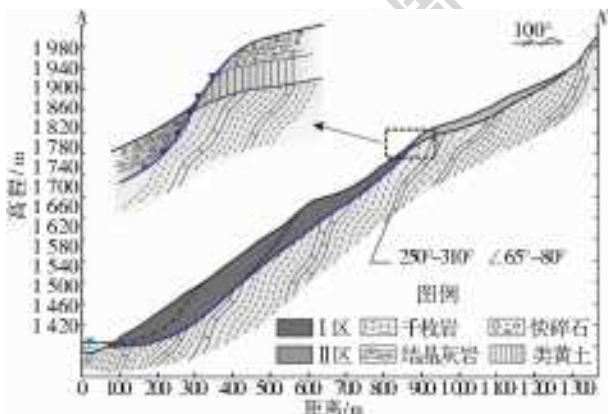


图 3 雁洛堆积体 A-A' 剖面

Fig. 3 Geological section A-A' of Yanluo accumulation

2.2.1 I 区(滑坡堆积区)堆积特征

滑坡堆积区为坡脚至高程 1 800 m 段, 区内堆积体主要为灰岩的块石、碎石混乱堆积, 滑坡纵向最大长度约 920 m, 平均宽度约 310 m, 呈长条状, 滑动方向为 280°。根据堆积体变形程度, 可分为下部强变形区(I-①区)和上部弱变形区(I-②区)两部分。

下部强变形区(I-①区), 属于滑坡堆积区的中下部, 从坡脚至高程 1 700 m 处, 为黄色-黄灰色灰岩的块碎石土堆积, 碎石直径约 $2 \sim \leq 20$ cm, 含量约为 20%~30%, 块石直径 $> 20 \sim 30$ cm, 含量约为 10%~20%, 局部可见大的孤石, 较大的有 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 。该区堆积体具有一定的分层特性, 主要表现为越靠近堆积体底部及前缘, 堆积体颜色越暗。区内横向裂隙发育, 最大裂缝长 $2 \sim 3$ m, 宽 $10 \sim 20$ cm, 后部可见多级“阶梯状”次级错动, 陡坎高 $13 \sim 22$ m, 指示了其具有牵引式滑动破坏特征, 滑动方向为 $284^\circ \sim 290^\circ$ 。调查发现, 前缘两侧可见小规模垮塌变形, 两侧边界处有水体渗出, 水的浸入使土体力学性质减弱, 使其沿裂隙发生垮塌破坏。

上部弱变形区(I-②区), 属于滑坡堆积体中上部, 高程 1 700~1 800 m 段, 为结晶灰岩、千枚岩的黄色块碎石土堆积, 与 I 区堆积组分相比, 区内块碎石含量较高, 其含量通常达 60% 以上。除因局部地形出现的小型滑塌外, 目前并未发现宏观整体变形裂缝。

2.2.2 II 区(复合堆积特征)

高程 1 800 m 至堆积体后缘为 II 区堆积范围, 区域纵向最大长度为 270 m, 平均宽度约为 315 m。区内为类黄土、崩坡积和残坡积组合的多层结构土层, 目前尚未出现明显变形。类黄土堆积下方常为岩层弯折变形形成的块碎石堆积或缓倾的“似层状”岩体(图 4(a)、4(b))。根据堆积体成因及形成的先后顺序可将 II 区进一步细分为类黄土堆积区(II-①区)、坡洪积区(II-②区)、后缘崩坡积区(II-③区)及侧缘崩积区(II-④区)。区内物质主要来源于川西高原黄土及斜坡岩体崩塌。

类黄土堆积区(II-①区), 高程 1 800~1 820 m 为类黄土堆积, 颜色呈褐黄色, 层厚 $1 \sim 2.5$ m, 疏松多孔, 垂直裂隙较为发育, 具有一定层理及湿陷性, 下伏基岩的弯曲折断使类黄土层发生明显的倾斜变形(图 4(a))。

坡洪积区(II-②区), 分布高程 1 820~1 915 m。高程 1 855 m 以下为黄色碎石土堆积, 主要为 $5 \sim 10$ cm 的碎石, 含量 45%~50%, 充填物主要为黄色的粉土(图 4(b))。高程 1 855 m 以上为密实的灰色碎石土堆积, 碎石岩性为灰岩, 充填物为粉砂和黏土, 具“正粒序”堆积特征, 如图 4(c)所示: 其上为直径 $3 \sim \leq 5$ cm 的碎石, 含量在 55%~65%; 其下为直径 $> 5 \sim 15$ cm 的碎石, 含量 50%~60%, 局部可见些许的大块石, 直径 $20 \sim 25$ cm。该区堆积的块碎石具有一定分选性, 由后缘崩坡积体经坡面流作用下堆积而成。

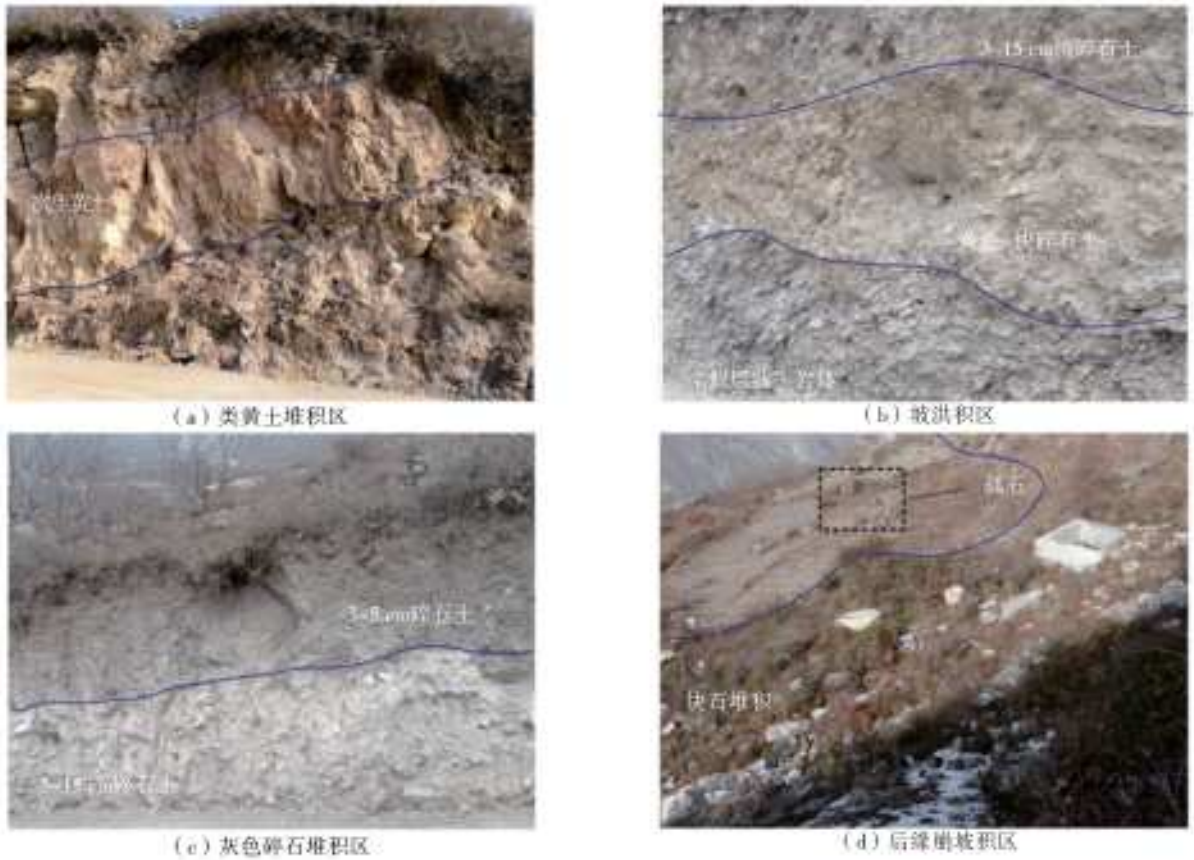


图 4 II 区堆积体组成特征

Fig. 4 Component characteristics of Yanluo accumulation

后缘崩坡积区(II-③区),分布高程 1 915 m 以上,堆积方向为 $246^{\circ}\sim 254^{\circ}$,主要为结晶灰岩、千枚岩的块碎石堆积,具有一定的“反粒序”堆积结构特征。堆积下部为直径 3~10 cm 的松散深灰色碎石土,碎石含量在 45%~50%;表层为大小混杂的孤块石,块石大小为 30~50 cm,孤石较大的有 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ (图 4(d))。堆积体后缘出露薄-中层状结晶灰岩,单层厚度 3~15 cm,发育两组明显节理,岩层倾角大于 70° 。后缘处于临空条件下,岩层倾角较陡,浅表层岩体在重力作用下呈波状弯曲,该变形促进了后缘岩体的变形破坏,使崩塌作用加剧。

侧缘崩积区(II-④区),分布在 II 区堆积右侧,堆积方向为 $200^{\circ}\sim 210^{\circ}$,为灰岩的碎石土,碎石直径多为 1~10 cm,最大为 15 cm,含量 45%~55%,少见大的块石。该区为侧缘岩体物理风化剥落堆积,其形成主要受控于岩层的两组节理面。

3 雁洛堆积体成因分析

3.1 形成影响因素分析

雁洛堆积体之所以有如此多样的组成特征,与所处区域构造运动及雁门沟内的地层岩性有着密切关系。构造运动常引起区域上气候的变化以及影响

河谷的演化,而地层岩性则是斜坡变形破坏方式的控制因素。

受青藏高原东缘构造运动的影响,第四纪以来整个川西高原气候复杂多变,表现为多个冷-暖的周期性变化^[18]。当气候温暖时,冰川消融引起河流水量增加,使河流的侵蚀能力加强;当气候干冷时,在冰缘环境下可发生类黄土沉积^[19-20]。新构造运动和地壳抬也是深切河谷发育的主要内动力条件^[21-24]。岷江河谷的发育始于上新世以来,伴随着岷山-龙门山构造带的早期隆升,整个流域河流下切速度较小,以侧向侵蚀为主;中、晚更新世时期,岷山-龙门山构造带处于快速隆升阶段,河流以强烈的下蚀作用为主^[21],其中以雁门沟所在的岷江上游南段下切最为强烈。岷江上游两个重要的下切阶段使流域内河谷剖面表现为上部宽谷型和下部峡谷型组合的“Y”型河谷形态,宽谷坡相对平缓,有利于雁洛堆积体上部黄土的沉积,而下部强烈切割的“V”型峡谷为堆积体中下部岩体的变形破坏提供了有利条件。

堆积体周围岩性以千枚岩、薄层状结晶灰岩为主,为软硬相间岩类,工程性质较弱。通常情况下,千枚岩岩性强度低,多呈塑性,在外力作用下易发生

“柔性”变形;结晶灰岩岩性强度较高,质地较硬,节理发育,由于岩层呈薄层状,局部发生一定的韧性变形,但变形程度较小,岩层多发生脆性折断或沿节理面破碎。

3.2 岩体变形破坏模式

调查发现,堆积体右侧边界为灰色、深灰色千枚岩夹薄层状结晶灰岩,岩层于高程 1 557~1 651 m 范围内发生普遍倾倒变形(图 5),变形剖面长度为 98 m。



图 5 峡谷区发育的岩层倾倒变形特征

Fig. 5 Properties of a toppling rock stratum in steep bedding slope at Canyon area

坡折以下峡谷形成过程中,外沟河段河流走向与区域最大主应力大角度相交,谷底应力集中程度高,谷坡岩体卸荷强烈^[1]。在该条件下,斜坡岩体发生应力重分布,且表现为坡体主应力迹线越靠近临空面,其最大主应力越接近平行于临空面。在最大主应力作用下,陡倾坡外的泥盆系月里寨组薄层状千枚岩及结晶灰岩临空后极易向临空面发生倾倒弯曲变形。

为了进一步分析斜坡的变形破坏过程,利用 UDEC 对斜坡在自由重力场下的变形及位移场特征进行数值模拟。根据堆积体 A-A' 剖面图建立概化模型。由于斜坡的倾倒变形破坏仅发生在峡谷区,故模型仅包括峡谷区及局部宽谷区,模型底边宽 900 m,左侧边界高 80 m,右侧边界高 500 m。结果见图 6、7。首先千枚岩在自身重力作用下沿千枚理向临空面发生明显的弯曲变形(6(a));随着变形的

发展,中后部岩体沿层面发生滑移,岩面的相对错动导致层间张裂,倾倒变形加剧,局部岩层根部折断,形成断续分布的折断面(图 6(b));在中、后部岩层倾倒的重力作用下,岩层折断逐渐向坡脚处延伸,折断面逐渐贯通(图 6(c))。折断面一旦接近贯通,陡倾坡外的滑移面形成,变形体稳定性将趋于临界状态,最终在降雨或地震作用下形成高位的弯曲-拉裂变形体,从而诱发大型滑坡并堵塞雁门沟。数值模拟获得的岩层变形特征与野外岩层的变形现象较符合,因此其结果基本再现了陡倾顺层岩质边坡的倾倒变形过程。

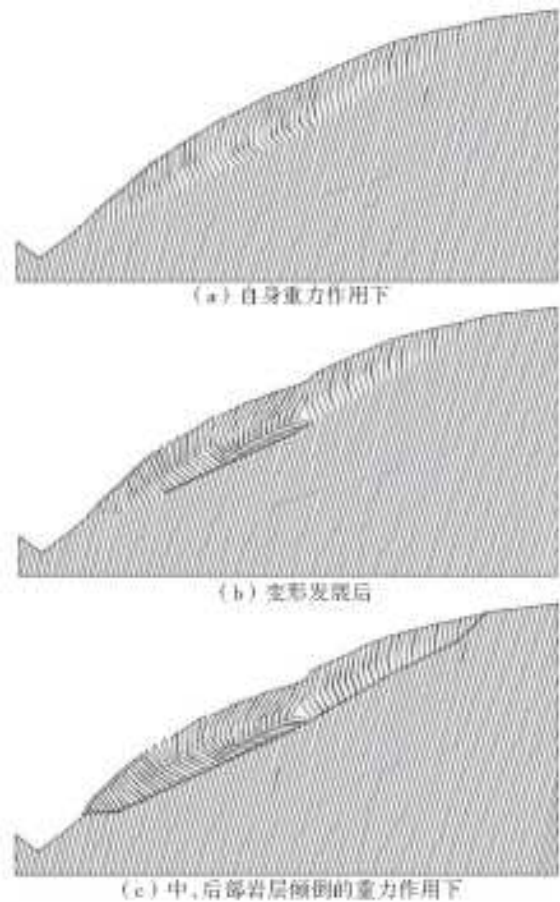


图 6 数值模拟获得的斜坡倾倒变形特征

Fig. 6 Characteristics of slope toppling deformation obtained by numerical simulation

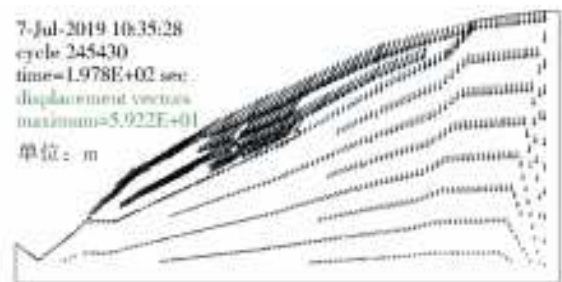


图 7 数值模拟获得的斜坡位移特征

Fig. 7 Displacement characteristics of slope obtained by numerical simulation

3.3 堆积体形成演化过程

更新世以来,伴随着青藏高原东缘的隆升,川西地区发生差异隆升,幅度由南东向北西增强。从早更新世-中更新世早期,岷江河谷溯源侵蚀,但下切速率相对较低,形成宽谷,当时昆仑山-秦岭地貌屏障还不显著,在宽谷两岸堆积西北吹来的黄土,后经坡面流搬运、沉积形成类黄土。中更新世中期以来,岷江快速下切,形成峡谷,雁洛陡倾坡外斜坡发生高位倾倒变形,随着最大弯折带岩体折断,倾向坡外的滑移面形成,在重力或强震诱发下,形成弯曲-拉裂滑坡。与此同时,上部类黄土分布区接受了中更新世晚期以来的崩坡积及全新世坡残积。前缘失稳

后,后缘临空,继续发生倾倒变形,上覆类黄土及崩坡积跟随下伏岩体变形并发生倾斜。由此,可以建立雁落堆积体形成演化过程的概念模型,可将其形成过程细分为如下 4 个阶段。

(1)更新世以来青藏高原的大幅度隆升,加强了对水汽的阻挡作用,使得川西高原大范围进入冰冻圈,在冬季表现为冷高压^[19-20],由于周围相对气压较低,气压梯度由中心指向外围,形成反气旋,反气旋气流吹起冰川沉积物的细粒物质^[25],在河岸披覆 2 m 左右的黄土。与此同时,后缘岩体沿两条节理面发生崩塌,堆积松散的块碎石,在坡面流水等作用下,黄土及崩落的块碎石再次沉积,形成类黄土(图 8(a))。

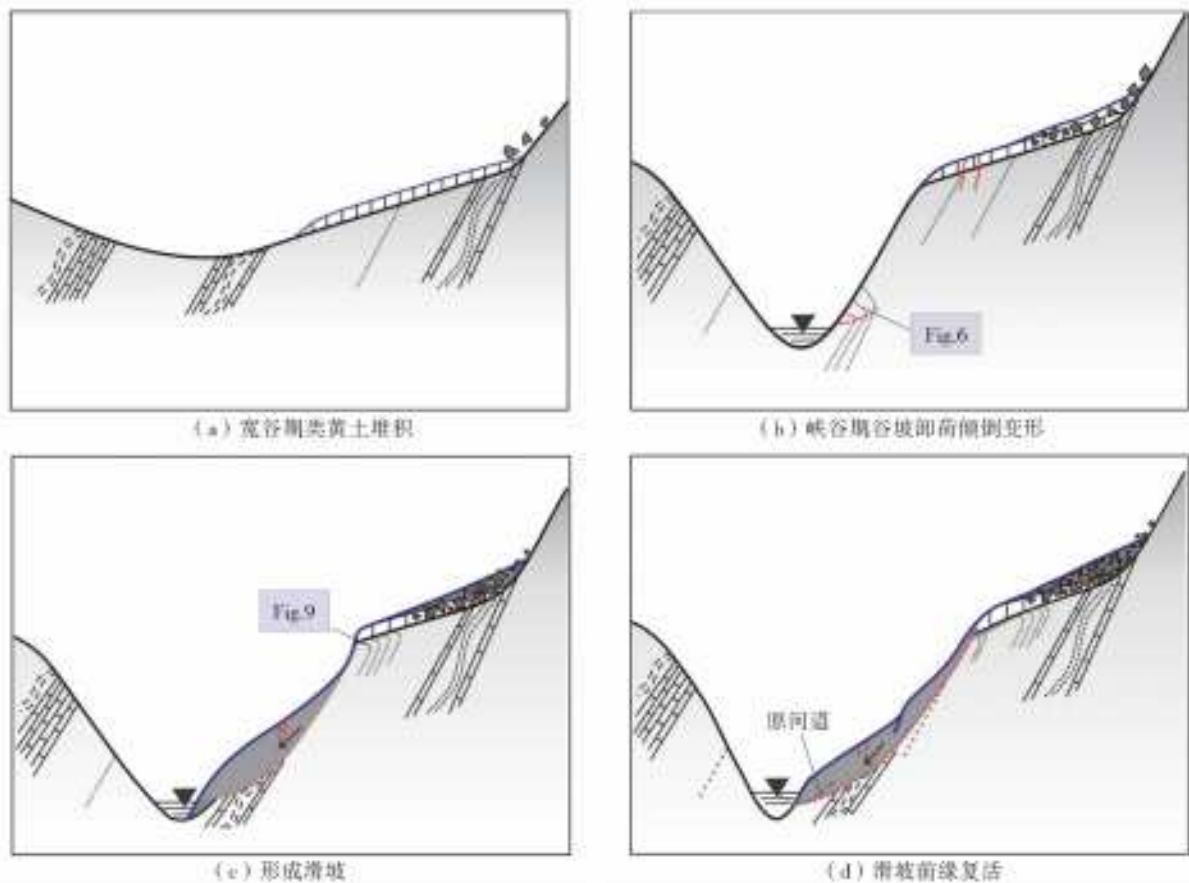


图 8 雁洛堆积体形成演化示意图

Fig. 8 The formative process of Yanluo accumulation

(2)中、晚更新世时期,岷山-龙门山的快速隆升使河流以强烈的下切侵蚀为主,形成峡谷。坡折附近拉应力集中,产生拉张裂隙;坡脚附近剪应力集中,岸坡表层千枚岩,薄层状灰岩从坡脚处开始逐渐朝临空面方向发生倾倒弯曲变形(图 8(b))。

(3)峡谷区发生多次“累进式”的倾倒变形破坏后,形成一定厚度倾倒变形体,最大弯折面演化成控制斜坡稳定的锁固段,随着最大弯折带岩体折断,倾向坡外的滑移面形成,倾倒地处于欠稳定

状态,在重力或强震诱发下,沿 286°方向发生牵引式滑动,滑坡发展演化的地质力学模式为倾倒-弯曲-拉裂模式。由于沟道较窄,堆积体阻塞河道,迫使河流逐渐向雁门沟左岸迁移(图 8(c))。前缘失稳后,后缘临空,加之在上覆堆积体的重力作用下,坡折以上岩体开始逐渐向临空面发生弯曲变形(图 9)。

(4)在河流长期的冲刷作用及公路削坡扰动下,滑坡体发生牵引式次级滑动,河床进一步向左岸迁

移。目前,因进村公路开挖坡脚以及洪水对坡脚的冲刷,下部滑坡体复活,出现牵引式变形,若继续发

展,中部堆积体前缘临空加剧,变形也将加剧,导致堆积体斜坡中前部处于欠稳定状态(图 8(d))。



图 9 坡折以上岩体弯曲变形

Fig. 9 Bending deformation of the rock above slope break

4 结 论

(1)雁洛堆积体形成时间跨度大,为早更新世-全新世。该堆积体为复合成因堆积,平面上具有分区性,可分为滑坡堆积区、高位斜坡复合堆积区 2 个大区以及 6 个亚区;纵向上具有分层性,整个坡体从上至下分别由残坡积物、崩坡积、类黄土堆积及滑坡堆积体等 4 部分组成。

(2)滑坡侧缘基岩变形行迹与数值模拟分析表明,在河谷下切过程中,坡折以下的斜坡变形破坏先后经历岩层弯曲、层间滑移、倾倒折断等 3 个阶段,形成一定规模的倾倒变形体,折断面逐渐贯通形成陡倾坡外的滑移面,最终在降雨或地震作用下发生滑动,其力学模式可概括为弯曲-拉裂型。

(3)斜坡演化分为 4 个阶段:早更新世-中更新世早期,青藏高原抬升,河流缓慢下切形成宽谷并堆积冰缘风成黄土;中更新世以来,河流快速下切形成峡谷,斜坡发生高位倾倒变形;斜坡倾倒变形加剧,形成弯曲-拉裂滑坡,滑坡后缘临空面形成,倾倒变形向后部扩展;坡脚冲刷与开挖,堆积体前缘复活,发生牵引式变形。

参考文献:

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
 [2] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 4 版. 北京: 地质出版社, 2015.
 [3] 韩蓓. 基于 GIS 的岷江上游汶川—叠溪河段滑坡灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
 [4] 陈旭, 杜飞翔, 杜宇本, 等. 岷江上游河谷重大重力地质灾害分布规律研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(8):

20-24. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-2106. 2015. 08. 004.
 [5] 赫子皓. 川西北高地应力集中规律及其与地质灾害关联性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
 [6] 李渝生, 王士天. 中国西南地区晚近期地壳构造应力场的演化历史及成因机制[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(1): 9-12.
 [7] 王国灿, 张克信, 曹凯, 等. 从青藏高原新生代构造隆升的时空差异性看青藏高原的扩展与高原形成过程[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(5): 713-727.
 [8] 蒋良文, 王士天, 李渝生, 等. 川西北倒三角形断块东部区域强震带形成机制与地震活动特征[J]. 地球科学进展, 2004(19): 225-230.
 [9] 蒋良文, 王士天, 王运生, 等. 川西北断块东部区域活动构造体系及其对地震活动的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(4): 340-344.
 [10] 贺承广. 龙门山构造带中段新构造活动特征研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
 [11] 王士天, 黄润秋, 李渝生, 等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998: 168-180.
 [12] 施裕兵, 李崇标, 周波. 西南某水电站右坝肩倾倒变形体发育特征及处理[J]. 四川水力发电, 2006(6): 77-79.
 [13] 任光明, 夏敏, 李果, 等. 陡倾顺层岩质斜坡倾倒变形破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3193-3200.
 [14] 任光明, 夏敏, 曾强, 等. 白龙江干流典型滑移-倾倒型滑坡的特征及形成机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 18-25. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-9727. 2015. 01. 03.
 [15] 蒋复初. 川西高原甘孜黄土地层学[J]. 地球学报, 1997, 18(4): 413-420.
 [16] 乔彦松, 赵志中, 王燕, 等. 川西甘孜黄土磁性地层学

- 研究及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2).
- [17] 乔彦松, 刘冬雁, 李朝柱, 等. 川西甘孜地区黄土的磁性地层学研究[J]. 地质力学学报, 2007, 13(4): 289-296.
- [18] 赵志中, 乔彦松, 王书兵, 等. 青藏高原东缘晚新生代地质特征与古环境变化[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1620-1626.
- [19] 王运生, 黄润秋, 段海澎, 等. 中国西部末次冰期一次强烈的侵蚀事件[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 73-76.
- [20] 张岳桥, 李海龙, 李建. 青藏高原 30—40 ka B. P. 暖湿气候事件对川西河谷地质环境的影响[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 481-492. DOI: 10. 3975/cagsb. 2016. 04. 10.
- [21] 赵小麟, 邓起东, 陈社发. 岷山隆起的构造地貌学研究[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 429-439.
- [22] 张岳桥, 杨农, 孟晖. 岷江上游深切河谷及其对川西高原隆升的响应[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(4): 331-339.
- [23] 李勇, 曹叔尤, 周荣军. 晚新生代岷江下蚀速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 28-37.
- [24] 张会平, 杨农, 张岳桥, 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 126-135.
- [25] 王运生, 李永昭, 向芳. 川西高原甘孜黄土的成因[J]. 地质力学学报, 2003, 9(1): 91-96.

(上接第 120 页)

- [21] WU Z J, WANG M M, CHEN S J, et al. Monitoring and evaluation of ecological environment's spatio-temporal variation in mine based on RSEI: A case of Yongding Mine[J]. Ecological Science, 2016, 35(5): 200-207. DOI: 10. 14108/j. cnki. 1008-8873. 2016. 05. 027.
- [22] DU T, JIAO J Z, XIE Y W, et al. Analysis of ecological environment changes from 2000 to 2015 in Qingyang, Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2019, 55(1): 26-32. DOI: 10. 13885/j. issn. 0455-2059. 2019. 01. 004.
- [23] ZHOU J X, LIU Z N, GU Y, et al. The eco-environment situation and dynamic changes for comprehensive management area of Ulan Buh Desert on the west of Yellow River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(4): 28-34. DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2014. 04. 005.
- [24] WANG F L, HE X Y, FANG Z X, et al. Assessment of the eco-environmental quality in Aberdare National Park based on longterm sequence remote sensing data [J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(9): 1479-1489. DOI: 10. 12082/dqxkx. 2019. 190117.
- [25] LIU P, REN C Y, WANG Z M, et al. Assessment of the eco-environmental quality in the Nanweng River nature reserve, northeast China by remote sensing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3347-3356. DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 201810. 014.