DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0083

LUO Wengong, WEI Xueli, CHEN Baocheng, et al. Analysis of debris flow damage along the China-Pakistan Economic Corridor: taking Aoyitake-Bulunkou Section of the Sino-Pakistan Highway as a case[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 773 – 783. [罗文功, 魏学利, 陈宝成, 等. 中巴经济走廊泥石流活动性分析: 以中巴公路奥布段为例[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 773 – 783. ]

# 中巴经济走廊泥石流活动性分析 ——以中巴公路奥布段为例

罗文功<sup>1,2</sup>, 魏学利<sup>2,3</sup>, 陈宝成<sup>2</sup>, 李 伟<sup>1,2</sup>, 李 宾<sup>2</sup>, 谢永利<sup>3</sup> (1.新疆大学建筑工程学院,新疆乌鲁木齐830046; 2.新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院,新疆 乌鲁木齐830006; 3.长安大学公路学院,陕西西安710064)

**摘** 要:中巴经济走廊内的中巴公路奥布段泥石流频发且类型复杂,严重影响着安全出行和贸易流通。 在对中巴公路奥布段沿线泥石流沟谷纵剖面形态分析的基础上,揭示其形态指数特征和活动程度,并 从区域地形、地质和气象等因素方面探讨了泥石流的活动性差异成因及危害性。研究发现:公路沿线 泥石流类型主要包括冰川型和降雨型两种,冰川型泥石流为27条,降雨型为26条。冰川型泥石流活 动性强烈,形态指数 N≥1 的沟谷占冰川型沟谷总数的81%,多数沟谷形态呈下凹状;降雨型泥石流活 动性相对较弱,形态指数 N≥1 的沟谷占其总数的50%,沟谷形态多呈上凸状。研究区大落差地形、不 同物源供给和充沛水源条件等对泥石流的发育和活动具有重要影响,也是不同类型泥石流活动性差异 的控制因素。研究结果可为研究区泥石流预测和防治提供指导,也可为中巴经济走廊区内交通工程选 线和泥石流防治提供参考。

关键词:中巴经济走廊;中巴公路;泥石流;剖面形态;活动性 中图分类号:P642.23 文献标志码:A 文章编号:1000-0240(2018)04-0773-11

### 0 引言

中巴经济走廊内的中巴公路奥依塔克镇至布伦 口段(以下简称奥布段)自然地理环境复杂,具有独 特的高海拔、大温差、强日照、冰川发育以及暴雨 局地性等特点,致使公路沿线泥石流灾害类型多样 且危害严重,造成毁桥埋路、中断交通等问题,进 行泥石流活动性的研究对于公路的安全畅通有着重 要的意义。

奥布段公路沿线地形条件复杂,新构造运动活 跃,加上多重因素共同作用,致使泥石流灾害尤为 严重。在泥石流形成的过程中,地形条件对泥石流 的发育起着控制性作用<sup>[1]</sup>,沟谷纵剖面形态是影响 泥石流沟道地形条件的重要因素,它表征流域的整 体走势、水源产汇流和水动力条件,对泥石流的形 成和发生起着关键作用。对于本区域泥石流的研究,前人多侧重泥石流分布特征、形成条件和危害程度等方面的研究<sup>[2-7]</sup>,往往忽略了泥石流的发育程度、活动性及其成因。针对研究区泥石流活动性的研究相对较少,为了更好控制突发泥石流对沟谷下方公路的破坏,本研究将实地调查和遥感分析等相结合,借鉴前人泥石流纵剖面形态分析方法,分析研究区泥石流沟谷纵剖面形态特征和泥石流活动程度,并探讨泥石流活动强弱的成因,得出泥石流活动性强弱与沟谷纵剖面形态、大落差地形、物源供给形式、水源条件等因素的关系,以期为中巴经济走廊内公路泥石流防灾减灾提供依据。

#### 1 泥石流类型与分布特征

中巴公路奥布段(图1)位于东帕米尔高原公格

收稿日期: 2017-11-07;修订日期: 2018-03-13

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41602331);中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2015015);中国博士后基金项目(2016M60 2951XB);新疆科技厅科技项目(2015-2017)资助

作者简介:罗文功(1993-),男,河南开封人,2016年在新疆大学获学士学位,现为新疆大学在读硕士研究生,从事公路泥石流形成机 理及防治研究. E-mail: lwg01051116@126.com

通信作者:魏学利, E-mail: weix18115@126.com.

 $\pm$ 

尔山脚下,沿盖孜河布设,路线长约70 km,以奥 依塔克镇为起点,终点为布伦口水库,是通往塔什 库尔干县、红其拉甫口岸的必经之路,是中巴公路 国内段的重要组成部分,也是中巴经济走廊的重要 通道。奥布段穿越多个地貌单元,气候和地形分带

性明显,沿线泥石流灾害类型复杂且危害严重。据 实地调查,对公路存在危害的主要泥石流沟共计有 53条,依据地貌、水源和泥石流类型的相关性,可 将沿线泥石流类型分布分为较明显的2个区和4个 段(表1)。



图1 中巴公路奥布段走向及沿线地形

Fig. 1 Map showing the terrain along the Aoyitake-Bulunkou Section of the Sino-Pakistan Highway

表1 中巴公路奥布段沿线泥石流分区及分段

Table 1 Information of the debris districts along the Aoyitake-Bulunkou Section of the Sino-Pakistan Highway

泥石流区域	泥石流区域类型	沟道纵坡比降/‰	沟口海拔/m	泥石流分段	泥石流类型	公路里程
奥依塔克镇 – 盖孜村	盖孜河宽谷雨洪型	98 ~ 555	1 760 ~2 424	奥依塔克镇 – 煤矿厂	雨洪型坡面泥石流	K1548 + 600 ~ K1553 + 400
	泥石流区			煤矿厂 – 盖孜村	雨洪型沟谷泥石流	K1553 + 400 ~ K1588 + 700
盖孜村 - 布伦口	公格尔山北坡冰川型	337 ~ 832	2 515 ~3 986	盖孜村 – 克郎姆	降雨和冰雪消融型泥石流	K1588 + 700 ~ K1615 + 200
	泥石流区			克郎姆 – 布伦口	冰川融水型坡面泥石流	K1615 + 200 ~ K1618 + 685

### 2 泥石流沟谷纵剖面形态模式

根据蒋忠信<sup>[8-10]</sup>的相关研究,典型平面形态的 泥石流沟谷和理想汇流的泥石流沟谷,其纵剖面形 态均可用以沟口作为原点的抛物线方程来表示,即

 $h = H(s/S)^{N} \tag{1}$ 

式中: N 为沟谷纵剖面形态指数,表征沟谷纵剖面的数学函数形状(N < 1 时为上凸抛物线, N = 1 时为直线, N > 1 时为下凹抛物线); s 为沟谷中平面上任意位置距沟口的长度(m); S 为沟谷平面内的总长度(m); H 为沟谷的上下游高差(m); h 为沟谷内任意位置与沟口的高差(m)。参数中 s、S、H和h均通过野外勘测获取。

53 条泥石流沟中形态指数 N≥1 的沟谷有 35 个,占沟谷总数的66%。降雨型和冰川型泥石流沟 谷在纵剖面形态上存在较大的差异。奥依塔克镇至 盖孜村段降雨型泥石流沟谷纵剖面形态如图2所示。26条降雨型泥石流多呈近直线和上凸形,形





Fig. 2 Relation curves between h/H and s/S of the 26 valley profiles of rainfall debris flows from Aoyitake to Gaizi

态指数 N≥1 的沟谷有 13 个,占降雨型总数的 50%。其中,沟谷处于发展阶段的有 17 个,占降雨 型泥石流各阶段中的 65% 以上,表明降雨型泥石流 绝大多数处于发展阶段。盖孜村至布伦口段冰川型 泥石流沟谷纵剖面形态如图 3 所示。27 条冰川型 泥石流大致呈下凹形和近直线形形态,沟谷形态指 数 N≥1 的有 22 个,占其总数的 81%。其中,沟谷 处于发展阶段的有 14 个,处于旺盛阶段有 10 个, 发展阶段和旺盛阶段沟谷数量之和占冰川型泥石流 各阶段的 88% 以上,说明冰川型泥石流大多处于发 展阶段和旺盛阶段。





#### 3 泥石流沟谷的活动性

在对公路沿线泥石流流域信息系统进行统计的 基础上,根据蒋忠信<sup>[8-10]</sup>提出的沟谷纵剖面形态指 数 N 等参数信息来表征泥石流沟谷的演化程度。 中巴公路奥布段沿线各沟谷形态信息如表 2 所示, 其中泥石流沟谷处于孕育阶段的有 1 个,占总数的 1.9%;处于发展阶段的沟谷有 31 个,占总数的 58.5%;处于旺盛阶段的泥石流沟谷有 15 个,占总 数的 28.3%;处于衰减阶段的泥石流沟谷有 5 个, 占总数的 9.4%;处于稳定阶段的沟谷有 1 个,占 总数的 1.9%(图 4)。其中,降雨型泥石流沟谷处 于孕育阶段的有 1 个,处于发展阶段的有 2 个,处 于旺盛阶段的有 5 个,处于衰减阶段的有 2 个,处 于稳定阶段的沟谷有 1 个;冰川型沟谷处于发展阶 段的有 14 个,处于旺盛阶段的有 10 个,处于衰减 阶段的有 3 个(图 5)。

沟谷纵剖面形态指数及流域系统的熵反映了流 域地貌演化阶段、泥石流的活动性和演化趋 势<sup>[11-12]</sup>。根据表2中各泥石流沟谷的纵剖面形态 指数、发展阶段和灾害特性,发现泥石流沟谷的流 域参数与沟谷的剖面线型、发育阶段以及泥石流的 活动性存在着对应关系。流域地貌接近最不稳定、 泥石流旺盛阶段的沟谷,泥石流频发,规模大且危 害严重,常常发生冲毁淤埋公路桥涵的灾害,如

表 2 53 条泥石流沟谷的纵剖面形态指数 N 及所处泥石流地貌演化阶段

Table 2 A summary of the 53 debris flow valleys, including their forming index of longitudinal profile and evolution phases

编号	泥石流 类型	公路里程	沟长 /m	流域面积 /km <sup>2</sup>	高差 /m	比降 /‰	纵剖面 形态	形态指数 N	泥石流地貌 演化阶段	泥石流活动性与灾害
1#	降雨型	K1549 + 600	1 630	0.38	204	125.0	上凹下凸	0.79	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋路面
2#	降雨型	K1549 + 870	2 811	1.12	276	98.2	上凸	0.66	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤埋路面
3#	降雨型	K1550 + 500	275	0.03	109	396.4	近直线	1.14	发展阶段(幼年期)	少发,小型,淤埋路面
4#	降雨型	K1550 + 800	430	0.04	145	337.2	凸	0.52	孕育阶段(幼年期)	少发,小型,淤埋路面
5#	降雨型	K1551 + 300	1 190	0.28	216	181.5	凸	0.81	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋路面
6#	降雨型	K1554 + 000	1 613	0.49	516	319.9	中凹	1.43	旺盛阶段(壮年期)	多发,大型,淤埋路面
7#	降雨型	K1554 + 700	880	0.21	434	493.2	凹	1.10	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤埋路面
8#	降雨型	K1555 + 700	2 410	1.83	333	138.2	复凸	0.79	发展阶段(幼年期)	中发,大型,冲毁桥路
9#	降雨型	K1556 + 070	3 025	1.86	473	156.4	上凸	1.02	发展阶段(幼年期)	中发,大型,冲毁桥路
10#	降雨型	K1558 + 050	727	0.32	221	304.0	近直线	1.01	发展阶段(幼年期)	多发,小型,淤积路面
11#	降雨型	K1558 + 900	4 700	4.00	561	119.4	折凸	0.96	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤积路面
12#	降雨型	K1559 + 300	640	0.14	286	446.9	上凸	0.77	发展阶段(幼年期)	少发,中型,淤积路面
13#	降雨型	K1560 + 800	10 748	23.64	2 139	199.0	凹	1.67	旺盛阶段(壮年期)	多发,大型,冲毁淤埋路面
14#	降雨型	K1562 + 200	4 830	6.50	600	124.2	近直线	0.96	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤埋冲毁桥路

	表2(续)									
编号	泥石流 类型	公路里程	沟长 /m	流域面积 /km <sup>2</sup>	、 高差 /m	比降 /‰	纵剖面 形态	形态指数 N	泥石流地貌 演化阶段	泥石流活动性与灾害
15#	降雨型	K1564 + 600	1 563	0.60	544	348.0	凹	1.26	旺盛阶段(壮年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
16#	降雨型	K1568 + 100	8 992	22.70	2 147	238.8	Ш	2.15	衰减阶段(壮年期)	少发,大型,淤埋冲毁桥路
17#	降雨型	K1569 + 700	6 066	9.49	1 564	257.8	凹	1.89	旺盛阶段(壮年期)	多发,大型,淤埋路面
18#	降雨型	K1570 + 700	2 307	1.38	969	420.0	凹	5.41	稳定阶段(老年期)	少发,大型,冲毁桥路
19#	降雨型	K1571 + 550	1 182	0.37	625	528.8	上凹下凸	0.89	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
20#	降雨型	K1572 + 000	1 118	0.43	620	554.6	凸	0.72	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
21#	降雨型	K1573 + 200	462	0.06	222	480.5	近直线	0.87	发展阶段(幼年期)	频繁,中型,淤埋冲毁桥路
22#	降雨型	K1574 + 100	3 200	3.54	886	276.9	凹	1.65	旺盛阶段(壮年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
23#	降雨型	K1576 + 300	2 218	0.92	951	428.8	Ц	0.85	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
24#	降雨型	K1577 + 900	7 807	15.55	1 943	248.9	上凸下凹	1.04	发展阶段(幼年期)	频繁,中型,淤埋冲毁桥路
25#	降雨型	K1585 + 800	6 787	40.06	2 053	302.5	Ш	2.37	衰减阶段(壮年期)	少发,中型,淤埋冲毁桥路
26#	降雨型	K1588 + 600	6 562	15.82	2 261	344.6	近直线	0.76	发展阶段(幼年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
27#	冰川型	K1595 + 900	6 490	13.98	2 189	337.3	近直线	0.89	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
28#	冰川型	K1601 + 600	8 907	43.85	3 446	386.9	Ш	2.12	衰减阶段(壮年期)	少发,中型,淤埋冲毁桥路
29#	冰川型	K1604 + 900	2 212	0.96	955	431.7	上凹下凸	1.13	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
30#	冰川型	K1605 + 100	6 272	16.75	3 020	481.5	Ш	1.43	旺盛阶段(壮年期)	多发,大型,淤埋冲毁桥路
31#	冰川型	K1605 + 200	1 907	1.03	983	515.5	凹	1.57	旺盛阶段(壮年期)	多发,大型,淤埋冲毁桥路
32#	冰川型	K1606 + 200	2 337	1.88	973	416.3	上凹下凸	0.65	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
33#	冰川型	K1609 + 700	1 171	0.20	831	709.6	近直线	0.99	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
34#	冰川型	K1610 + 000	1 386	0.22	921	664.5	Ш	1.14	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
35#	冰川型	K1610 + 400	1 780	0.21	1 108	622.5	凹	1.38	旺盛阶段(壮年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
36#	冰川型	K1610 + 700	2 142	0.27	1 270	592.9	Ш	1.23	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
37#	冰川型	K1611 + 100	3 185	0.88	1 763	553.5	凹	1.21	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤埋冲毁桥路
38#	冰川型	K1611 + 700	2 583	0.28	1 463	566.4	凹	1.21	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
39#	冰川型	K1612 + 100	3 560	0.93	1 978	555.6	近直线	1.27	旺盛阶段(幼年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
40#	冰川型	K1612 + 900	2 878	0.56	1 427	495.8	凹	1.22	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤埋冲毁桥路
41#	冰川型	K1613 + 400	4 632	2.48	2 119	457.5	凹	2.20	衰减阶段(壮年期)	少发,中型,淤埋路面
42#	冰川型	K1614 + 600	5 200	3.03	2 121	407.9	凹	1.39	旺盛阶段(壮年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
43#	冰川型	K1615 + 600	4 410	8.59	1 977	448.3	Ш	1.73	旺盛阶段(壮年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
44#	冰川型	K1616 + 100	3 120	1.63	1 529	490.1	凹	0.99	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤埋冲毁桥路
45#	冰川型	K1617 + 500	2 628	1.58	1 541	586.4	Ш	1.24	发展阶段(幼年期)	多发,大型,淤埋冲毁桥路
46#	冰川型	K1618 + 600	2 020	0.67	1 055	522.3	近直线	0.87	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
47#	冰川型	K1618 + 900	1 425	4.19	835	586.0	Ш	1.51	旺盛阶段(壮年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
48#	冰川型	K1619 + 400	1 335	1.40	1 111	832.2	凹	2.91	衰减阶段(壮年期)	少发,中型,淤埋路面
49#	冰川型	K1620 + 500	8 710	9.99	3 145	361.1	近直线	1.06	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
50#	冰川型	K1621 + 800	2 903	1.54	1 300	447.8	凹	1.39	旺盛阶段(壮年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
51#	冰川型	K1622 + 800	4 050	1.48	1 398	345.2	凹	1.80	旺盛阶段(壮年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路
52#	冰川型	K1623 + 700	1 521	1.73	580	381.3	近直线	1.02	发展阶段(幼年期)	多发,中型,淤埋冲毁桥路
53#	冰川型	K1624 + 200	4 407	6.51	2 069	469.5	凹	1.34	旺盛阶段(壮年期)	频繁,大型,淤埋冲毁桥路





Fig. 4 The percentage of various developmental phases of debris flow in the debris flow valleys









K1605 + 100 处的 30 # 沟(艾尔库然沟) 是典型的冰 川型泥石流, 沟系呈条带状, 沟道总体顺直, 沟谷 形态多呈 V 形,沟道纵剖面形态指数 N 为 1.43, 纵剖面形态呈明显下凹抛物线(图6),发育程度为 旺盛阶段(壮年期),在之后的衰减阶段和稳定阶段 流域地貌将趋向稳定方向发展:处于泥石流发展阶 段的沟谷, 泥石流虽多发, 但规模稍小, 危害次于 旺盛阶段的泥石流沟谷,如 K1551+300 处的 5#沟 是典型的降雨型泥石流,断面形态多呈U形,沟道 纵剖面形态指数 N 为 0.81,纵剖面形态为上凸抛 物线(图6),发育程度为发展阶段(幼年期),危害 相对于旺盛阶段较轻;处于泥石流衰减阶段的沟 谷,泥石流少发或中发,活动性相对较弱,危害相 对于发展阶段和旺盛阶段的泥石流沟谷较轻,沟谷 已达或趋于稳定形态。

不同发育阶段的泥石流沟谷, 灾害特征及演化 趋势呈现较大的差异。处于发展阶段幼年期的泥石 流沟谷,现阶段泥石流规模稍小,在接下来的泥石 流沟谷发育中会进入旺盛阶段,在其他条件不变时 泥石流活动将会增强; 地貌现接近泥石流最旺盛阶 段的沟谷,如13#沟(N=1.67)、22#沟(N=1.65) 和 31 # 沟(N = 1.57) 等沟谷, 泥石流多发且危害严 重,在接下来的衰减阶段和稳定阶段,流域地貌将 向稳定方向发展,在影响泥石流活动的其他条件不 变时泥石流活动将会减弱;处于稳定阶段和衰减阶 段的泥石流沟谷,泥石流活动将会减弱,沟谷纵剖 面形态也会趋于稳定。

另外,根据对泥石流活动性的进一步分析发 现,降雨型和冰川型泥石流中处于发展阶段的沟谷 均处于幼年期,虽灾害频发,但往往规模较小,造 成的危害也较小,此后沟谷将向旺盛阶段发展,最 终趋于稳定方向:冰川型泥石流沟道的高差和纵比 降参数普遍大于降雨型,造成了冰川型泥石流不稳 定且破坏程度大的特征。

#### 泥石流活动性强弱成因分析 4

#### 4.1 大落差地形梯度促进了泥石流的发育

盖孜河沿线位于山岭重丘区,公路多依山傍河 而行,公路线位最高海拔3560m。中巴公路奥布 段平均纵坡比降达 22.86‰, 周边的昆盖山和公格 尔山海拔高度多在4000 m 以上,其中公格尔山最 高峰达到7649m, 地势上与盖孜河谷形成巨大落 差,其中昆盖山与公路最大高差达3430m,公格 尔山与公路最大高差可达4485m(图7)。公格尔 山地区冰川主要为冰帽冰川和悬冰川,冰川融水沿 大落差陡峭山坡倾泻而下,高位势能瞬间转化为强 大水流动能,可在较短时间冲刷堆积扇松散物质而 形成规模较大的泥石流,故巨大地势落差也成为泥 石流灾害多发的重要原因。





另外,在公格尔山东侧,从塔里木盆地边缘到 公格尔山顶,在水平距离约45 km 的范围内,海拔 从约1720 m 上升到7649 m,地面抬升幅度达 5929 m,抬升率为0.132(图8)。按照明显的抬升 幅度不同,将其地形抬升分为三个梯度,在这三个 梯度中,第Ⅲ梯度抬升率为0.255,抬升最快,第Ⅰ 梯度次之,抬升率为0.090,第Ⅱ梯度抬升率为 0.040,抬升最慢;第Ⅲ梯度抬升率明显快于第Ⅰ 梯度和第 II 梯度(表3)。因此,地形梯度差异造成 公路沿线泥石流沟谷剖面形态模式不同,进而影响 泥石流活动程度,如降雨型泥石流沟道纵剖面形态 多呈上凸抛物线型,泥石流活动性弱,危害程度 小;冰川型泥石流沟谷纵剖面形态多为下凹抛物 线,沟谷地势呈现"上陡下缓"的大致形态,沟道比 降大,与公格尔山地形剖面线形态相一致,泥石流 发育强烈。



图 8 中巴公路沿线公格尔山线状地形剖面图 Fig. 8 A profile of Sino-Pakistan Highway from the edge of the Tarim Basin to the summit of the Kongur Mountain; three uplift sections can be seen

Table 5 Comparison of the three upnit sections in Kongur Wountain along the Sino-Takistan Fighway								
分段号	水平距离/km	起始高度/m	末端高度/m	抬升幅度/m	地形抬升率			
Ι	20	2 700	4 500	1 800	0.090			
П	15	4 500	5 100	600	0.040			
Ш	10	5 100	7 649	2 549	0.255			

表 3 中巴公路沿线公格尔山地形抬升率对比

深切沟谷的形成,一方面是由于山顶的抬升作 用;另一方面则是由于下切和侵蚀所造成的<sup>[13]</sup>。 首先,公路沿线公格尔山的三段梯度抬升幅度有着 明显的差异,潘裕生<sup>[14]</sup>、马钦忠等<sup>[15]</sup>、李吉均<sup>[16]</sup> 研究发现这三个梯度即与青藏高原海拔抬升过程差 异相对应。其次,泥石流沟道的侵蚀不仅与沟道自 身地质及岩性特征有关,还与沟道纵比降联系紧 密。故当沟道上游坡降较大时,泥石流在发生初期 便会拥有较大的前端速度,继而产生强大的下切力 和冲击力,发生沟道深切侵蚀;而沟道下游的坡降 普遍较缓,发生的沟道侵蚀作用较小,并在最终以 淤积作用为主导。综上所述,巨大的地形落差、地 形隆起梯度的明显差异以及山体坡降大等多种条件 的共同作用,为泥石流提供了良好的发育条件。

#### 4.2 物源供给形式决定了泥石流活动性强弱

山体历经多次构造隆升作用后,导致岩体挤压 变形严重、断褶发育,使岩体结构完整性较差,又 加上寒冻风化作用,表层岩石揉搓破碎,多发小型 崩塌落石灾害,为泥石流提供不同种类的物源。研 究区泥石流物源主要来自于老泥石流堆积层,并以 沟道堆积物和老堆积扇物质形式存在,各类物源最 终会在水流(降雨或融水)的冲刷作用下,使沟道堆 积物集中补给启动而形成泥石流。

岩石的剥蚀速率与岩石的岩性和岩体所处环境 有关<sup>[17-18]</sup>。昆盖山地形分段资料如图9所示,山 体地层大部分处于石炭纪,低海拔降雨型泥石流区 山体由沉积岩、灰岩、砂岩和页岩等组成,属于软 质岩,剥蚀速率大,故岩体在水蚀、风蚀等作用及





局地岩体挤压下易形成沟道松散物质,成为泥石流 物源供给。与降雨型泥石流区不同, 高海拔冰川型 泥石流区山体组成岩石主要为花岗岩,属于坚硬岩 石,剥蚀速率小,故剥蚀作用为冰川型泥石流提供 的物源较小,但在一定程度上仍为泥石流提供物源 供给。前人研究发现,灰岩和砂岩等沉积岩的剥蚀 速率区间为 20~1 400 m·Ma<sup>-1</sup>, 其平均值明显大 于花岗岩的平均剥蚀速率(218 ± 35) m · Ma<sup>-1[19-20]</sup>。但受冰川型泥石流所处的高寒气候环 境因素影响,研究区域内构造运动加剧,冰川作用 和冻融风化作用强烈,年日照时数可达3000~ 3 300 h, 温度区间约为-5~5℃, 且历史上曾至少 经历过6次冰进冰退<sup>[21]</sup>,在山麓两岸形成了大量 冰碛物和冰水堆积体,为冰川型泥石流发生提供了 丰富的物源,也使得冰川型泥石流活动性异常 强烈。

#### 4.3 优越水热条件促进了泥石流频发

在泥石流的形成过程中,除一定的地形、充足 的松散固体物质(主要由地质条件决定)条件外,还 须具备丰富的水源条件<sup>[1,22-23]</sup>。泥石流的暴发所 需水源条件与降雨和气温条件有关,即水热组合条 件,优越的水热条件对泥石流的激发有着很大的促 进作用<sup>[24-25]</sup>。中巴公路奥布段沿线水源的丰富程 度及其类型特点主要取决于当地的气候环境,盖孜 河所在的喀什噶尔河流域属于塔里木盆地内陆干旱 地区,区内属温带大陆性干旱气候,年径流量主要 集中在6-8月<sup>[26-27]</sup>。当地水资源时空分布不均, 地形条件复杂,加之不同的地貌特征孕育了研究区 不同的气候环境。其中降雨型泥石流区的水源供给 主要由降雨径流提供,而冰川型泥石流区的水源主 要由冰川消融和冰雪融水供给。

(1)奥布段公路沿线降雨型泥石流主要分布在 奥依塔克镇至盖孜村段,年平均降水量介于97.2~ 127.5 mm,降水量丰富且集中,主要集中在气温较 高的5-9月(图10),降雨类型以局地短历时暴雨 为主,且出现频率较高,又加上该区域坡面植被稀



图 10 奥布段公路气温和降雨量的年内变化 Fig. 10 Monthly variations of air temperature and precipitation along the Aoyitake-Bulunkou Section

少,降雨产汇流较快,极大增加了降雨型泥石流的 活动性。

(2)在高寒地区,冰川消融和冰雪融水成为泥石流形成的重要水源。春夏升温和高温季节,冰雪 消融加剧,为冰川泥石流的形成提供了丰富的水 源<sup>[23]</sup>。影响冰川融水的主要条件包括温度和一定量的降水,且以温度升高时最为显著,优越的水热 条件对于冰川型泥石流的激发起到重要的作用<sup>[24]</sup>。 奥布段冰雪区域主要分布于盖孜村至布伦口段,该 段位于公格尔山极高山区——帕米尔高原最大的现 代冰川作用中心,终年积雪,公格尔山北麓盖孜河 的多年平均年径流量为9.78×10°m<sup>3</sup>,其中冰川融 水补给占 77.83%<sup>[28-29]</sup>。丰富的冰川融水成为该 地区冰川泥石流的主要补给水源。

### 4.4 泥石流活动性影响着盖孜河主河道的侵蚀 淤积变化

泥石流具有强烈的冲淤作用,能在很短时间内 将巨量泥沙及混杂的固体物质输入主河道,对主河 道产生淤堵和堆积作用,影响主河道河床演化,改 变河道形态<sup>[30-31]</sup>。由于公格尔山构造隆升强烈, 形成现今盖孜河谷曲折走势和狭窄起伏地形,盖孜 河不同河段侵蚀淤积速率不同,河谷形态变化大, 加之上沿岸泥石流的大量发育,将大量沟道物质携

 $\pm$ 

带至盖孜河主河道产生淤积作用,进而短期内影响 盖孜河不同河段的断面形态。根据实地勘测,从盖 孜河上游至下游沿主河道分别选取四个典型断面为 例,论述泥石流活动性对盖孜河冲蚀淤积现象的影 响(图11),典型断面参数见表4。

根据盖孜河多个河段的河谷形态不同,可分为 以下两个区:①从布伦口至盖孜村段为盖孜河深切 V形河谷区,下切侵蚀严重,致使河道比降大、输 沙能力强,泥石流输送的沟道松散物质在主河道的 淤积作用较小,主河道侵蚀基准面降低;②从盖孜 村至奧依塔克镇段为盖孜河宽浅U形河谷区,主河 道主要受到泥石流携带的泥沙堆积物的淤积作用, 以淤积抬升为主,河道侵蚀基准面不断抬高。由图 11 可以看出,主河道上游横断面 a 呈 V 形,河道坡 降大、水势急,虽然沿岸冰川融水型坡面泥石流活 动性强烈,泥沙堆积物携带量大,但在主河道强烈 的输沙能力下,河道淤积作用极小,深切作用强 烈;主河道中游横断面 b 为近 U 形,河道两岸的高



#### 图 11 盖孜河主河道典型断面形态特征

Fig. 11 The channel cross profiles of the Gaizi River: in the upper main channel K1617 + 500 (a), in the upper and middle main channel K1613 + 400 (b), in the middle and lower main channel (K1568 + 100)(c),

in the lower main channel K1551 + 300 (d)

表 4 盖									
横断面序号	公路里程	所处位置	横断面最大高宽比	水面宽度/m	水面海拔/m	附近沟道最大纵比降/‰			
а	K1617 + 500	上游	1:8	39	3 258	586.4			
b	K1613 + 400	中上游	1:18	61	2 649	457.5			
с	K1568 + 100	中下游	1:24	83	2 022	238.8			
d	K1551 + 300	下游	1:145	260	1 762	181.5			

注:附近沟道指附近泥石流沟道,其沟道纵比降计算采取全线高差求解法和分段求解法<sup>[32]</sup>

宽比明显缓于横断面 a, 在较强的输沙能力下,沿 岸降雨和冰雪消融型泥石流输送的沟道物质易被水 流冲蚀,河道淤积作用小; 主河道中游横断面 c 为 U形河谷,河岸高宽比较小,加之上沿岸雨洪型沟 谷泥石流多发,携带大量泥沙和沟道松散物质淤积 河道,造成河道横断面渐趋平缓; 主河道下游横断 面 d 为宽阔河漫滩形式,沿岸雨洪型坡面泥石流多 发且携带泥沙物质输入盖孜河主河道,产生淤积改 道现象,形成平缓河滩地势。因此,沿岸泥石流的 活动性对盖孜河主河道的侵蚀淤积变化以及河道横 断面的演化有着重要作用。

在短期泥石流冲蚀淤积作用下,泥石流活动性 对主河道的断面演化有着重要的影响。而从长远地 质历史时期来看,公格尔山地区强烈构造抬升和盖 孜河侵蚀下切作用,也对河谷两岸的泥石流活动性 具有控制作用,如在地质活跃期内,主河道侵蚀下 切严重,将促使两岸泥石流沟口侵蚀基准面下降, 促进泥石流活动增强,因此,泥石流对盖孜河的侵 蚀淤积程度与两岸泥石流活动性强弱是相辅相成、 互为因果的关系。

对图 11 和表 4 中河道的断面演化参数对比还 可发现:①河道的横断面高宽比逐渐降低,如由上 游的1:8 减小为下游的1:145,河道堤岸坡度渐趋 平缓,河道横断面由深切V形,逐渐演化为U形河 谷, 表现为河谷由侵蚀作用转变为以淤积作用为主 导,导致河床基准面抬升。②河道宽度呈现从上游 至下游逐渐增大的态势,如从上游最初 39 m 宽的 狭窄地形最终变为下游260 m 宽的河漫滩形式,河 道水流深度也逐渐变浅,侵蚀作用减弱,表现为地 形条件和泥石流活动所携带泥沙输入主河道等共同 促使盖孜河由上游的下切侵蚀逐渐过渡为下游的大 面积淤积现象。③不同形态的河道横断面会对沿岸 泥石流沟道的活动性造成影响,如从横断面 a 到 d 的过渡过程中可见附近沟道纵比降逐渐变小,由最 初的 586.4‰减小为 181.5‰,侧面也表明河道的 淤积现象导致泥石流沟道的侵蚀作用减弱, 坡降 变缓。

#### 5 结论

(1)中巴经济走廊内的中巴公路奥布段泥石流 共计53条,分为27条冰川型泥石流和26条降雨 型泥石流。形态指数 N≥1的沟谷共有35个,占沟 谷总数的66%,泥石流纵剖面形态总体上呈现出下 凹形和近直线形居多的特点,部分沟谷形态呈上凸 形。冰川型泥石流中形态指数 N≥1 的沟谷占冰川 型沟谷总数的 81%,其中处于发展阶段的有 9 个, 处于旺盛阶段的有 10 个,衰减阶段为3 个,沟道形 状多呈下凹形,泥石流活动性强烈,大型泥石流灾 害频发,常常淤埋冲毁路桥。降雨型泥石流形态指 数 N≥1 的沟谷占其总数的 50%,其中处于发展阶 段的有 5 个,处于孕育阶段、旺盛阶段、衰减阶段 和稳定阶段的共8 个,降雨型沟道形状总体上多呈 近直线形和上凸形,活动性较弱,中发或多发中小 型泥石流灾害,时常造成淤埋路面。总体来说,冰 川型泥石流活动性强烈,降雨型泥石流活动性 较弱。

(2)公路沿线大落差地形梯度促进了泥石流的 发育,不同物源供给形式决定着泥石流活动性强 弱,泥石流的活动性对盖孜河主河道侵蚀淤积变化 有着重要影响。其中冰川型泥石流物源为丰富的冰 碛物供给,降雨型泥石流物源多为老泥石流沟道堆 积物和沟道松散物质。在大落差地形梯度下,沿线 泥石流沟道上下游形成较大的地势落差,促进泥石 流活动性增强,灾害程度加重。泥石流活动频繁, 携带的沟道松散物质输入主河道影响盖孜河的冲蚀 淤积变化和横断面演化;而河谷横断面形态演变过 程中,河道横断面高宽比逐渐减小,主河道侵蚀基 准面抬高,两侧泥石流沟道纵比降表现出变缓态 势,泥石流活动性逐渐减弱。

#### 参考文献(References):

- [1] Zhu Yuan, Yu Bin, Qi Xing, et al. Topographical factors in the formation of gully type debris flows in the upper reaches of Min-jiang River[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 268 277. [朱渊,余斌,亓星,等. 地形条件对泥石流发育的影响: 以岷江流域上游为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1): 268 277.]
- [2] Liu Jie, Mao Aimin, Wang Libo, et al. Debris flow disaster and prevention on the Aoyitake-Bulunkou section of Karakoram Highway from China to Pakistan[J]. Highway, 2015(12):8-14.
  [刘杰,毛爱民,王立波,等.中巴喀喇昆仑公路奥依塔克镇~布伦口段泥石流灾害及防治[J].公路, 2015(12):8-14.]
- [3] Lu Jun, Liu Jie, Wang Libo. Debris flow hazards and prevention along the Aoyitage-Bulunkou section of the international Karakoram Highway [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2015, 17(2): 42-49. [陆军,刘杰,王立波.中巴喀喇昆仑 公路奥依塔克 - 布伦口段泥石流灾害及防治[J].防灾科技学 院学报, 2015, 17(2): 42-49. ]
- [4] Wei Xiaojia, Pei Xiangjun, Meng Minghui. Characteristics of debris flow at Aoyitake-Bulunkou section of Sino-Pakistan Highway in alpine mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(3): 354-358. [魏小佳, 裴向军, 蒙明辉. 中巴公路奥依塔克 – 布伦口段高寒山区泥石流特征[J]. 水土

土

保持通报,2015,35(3):354-358.]

- [5] Wang Libo. Debris flow disaster and prevention of highway from Aoyitake Town to Bulunkou section of G314 line[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2015(2): 35-37. [王立 波. G314 线奥依塔克镇至布伦口段公路泥石流灾害及防治 [J]. 内蒙古公路与运输, 2015(2): 35-37.]
- [6] Li Wei, Wei Xueli, Song Xueyi, et al. Characteristics and prevention of debris flow in Tuokayi Gully at K1562 of Sino-Pakistan Highway[J]. Southwest Highway, 2016(3): 66 – 70. [李 伟,魏学利,宋学艺,等.中巴公路 K1562 处托喀依沟泥石流 特征与防治[J].西南公路, 2016(3): 66 – 70.]
- [7] Zhang Xuejin. Study on the distribution characteristics and control for geological disasters along international Karakoram Highway (KKH)[J]. Journal of Chongqing Technology Business University (Natural Science Edition), 2013, 30(2): 45 50.
  [张学进.中巴公路沿线地质灾害分布特征及防治[J].重庆 工商大学学报(自然科学版), 2013, 30(2): 45 50.]
- [8] Jiang Zhongxin. Model of minimum energy dissipation in evolution of valley longitudinal profile of debris flow in southeast Tibet area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(1): 25 31.
  [蒋忠信. 藏东南泥石流沟纵剖面演化的最小功模式[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 25 31.]
- [9] Jiang Zhongxin. A statistical analysis on longitudinal profile shape of debris flow valley along Palongzangbu River in Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(4): 43-49. [蒋忠信. 西藏帕隆藏布泥石流沟谷纵 剖面形态统计分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12 (4): 43-49.]
- [10] Jiang Zhongxin. Models of shape and evolution on longitudinal profile of ice-snow melt-water valley[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(4): 19-25. [蒋忠 信. 冰雪融水沟谷纵剖面的形态与演化模式[J]. 中国地质灾 害与防治学报, 2003, 14(4): 19-25.]
- [11] Jiang Zhongxin. Topological entropy of debris flow basin[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1992, 3 (1): 33-40. [蒋忠信. 泥石流流域地貌的超熵[J]. 中国地 质灾害与防治学报, 1992, 3(1): 33-40.]
- [12] Yue Tianxiang, Ai Nanshan, Zhang Yingbao. Superentropy: a criterion for determining stability of drainage system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 3(2): 20 27. [岳天祥, 艾南山, 张英保. 论流域系统稳定性的判别指标:超熵[J]. 水土保持学报, 1989, 3(2): 20 27.]
- [13] Zhao Shangmin, Cheng Weiming, Zhou Chenghu, et al. Analysis on the topographic gradient and geographical meaning of Mt. Konggur, in the northern edge of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(6): 753 758.
  [赵尚民,程维明,周成虎,等. 青藏高原北缘公格尔山地区地形梯度的剖析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 753 758.]
- [14] Pan Yusheng. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 153 163. [潘裕生. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 153 163.]
- [15] Ma Qinzhong, Li Jijun. Study on differential uplift of the north edge of Tibetan Plateau during the late Cenozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 590-598. [马钦忠, 李吉均. 青 藏高原北缘晚新生代的差异性隆起特征[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 590-598.]
- $[\,16\,]$  Li Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang ( Tibetan ) Plateau and Asian monsoon [ J ]. Marine

Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(1):1-11. [李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1):1-11.]

- [17] Yuan Guangxiang, Shang Yanjun, Yang Zhifa. Analysis of rock weathering rate and influencing factors in Bomi region, southeast Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(2): 191-196. [袁广祥,尚彦军,杨志法.藏东南波密地区岩石风化 速率及其影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 191-196.]
- [18] Zhao Shangmin, Zhou Chenghu, Cheng Weiming, et al. Relationships between topographic uplifting velocity and geological times for the northwestern edge of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(5): 616-626. [赵尚民,周成虎,程维明,等. 青藏高原西北缘地形抬升速率与地质年代的关系[J]. 山地学报, 2011, 29(5): 616-626.]
- [19] Cui Lifeng, Liu Congqiang, Xu Sheng, et al. Denudation rate of granite weathering crust in Qinhuangdao: preliminary results of nuclide research in the universe [C]// Proceedings of the 10th National Symposium on Isotopic Geology and Isotope Geochemistry. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2013: 125. [崔丽峰,刘丛强, 徐胜, 等. 秦皇岛花 岗岩风化壳剥蚀速率:宇宙成因核素研究的初步结果[C]//第 十届全国同位素地质年代与同位素地球化学学术讨论会论文 集. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2013: 125.]
- [20] Liu Jipeng. A study on the denudation rate for the southern slope of the Nanling Mountains, China[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007. [刘继鹏. 南岭南坡剥蚀速率研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2007. ]
- [21] Wang Jie, Zhou Shangzhe, Zhao Jingdong, et al. Quaternary glacial geomorphology and glaciations of Kongur Mountain, eastern Pamir, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41 (3): 350 361. [王杰,周尚哲,赵井东,等. 东帕米尔公格尔山地区第四纪冰川地貌与冰期[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(3): 350 361.]
- [22] Zhu Zhongli, Liu Xilin, Shang Zhihai. Analysis on the developing conditions of debris flow induced by Wenchuan earthquake in Zhaojia Gully of Beichuan County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21 (4): 57-62. [朱忠礼,刘希林,尚志海.四川省北川县赵家沟 地震次生泥石流形成条件分析[J].中国地质灾害与防治学 报,2010,21(4): 57-62.]
- [23] Cui Peng, Lin Yongming. Influences of natural and engineering factors on formation of debris flow and landslide along mountainous roads[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(3): 11 16. [崔鹏,林勇明. 自然因素与工程作用对山区道路泥石流、滑坡形成的影响[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 11 16.]
- [24] Deng Mingfeng, Chen Ningsheng, Ding Haitao, et al. The hydrothermal condition and formation mechanism of the group-occurring debris flows in the southeast Tibet in 2007[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(4): 128 134. [邓明枫,陈宁生, 丁海涛,等. 2007 年西藏东南部群发性泥石流的水热条件及 其形成机制[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(4): 128 134.]
- [25] Tibet debris flow and environment [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1999. [西藏泥 石流与环境[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1999.]
- [26] Asadilla Yusup, Anwaer Maimaitiming. Prediction of water consumption in the urbanization course in Kashgar Prefecture, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39 (3):688-695. [艾萨迪拉·玉苏甫,安瓦尔·买买提明.新 疆喀什地区城镇化过程中用水量预测[J].冰川冻土,2017,

39(3):688-695.]

- [27] Wang Rongmei, Ayxamgvl, Yu Lan, et al. Sandstorm weather in Kashgar Prefecture of Xinjiang region: spatial and temporal distribution characteristics and control measures [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1553 – 1559. [王 荣梅,阿依仙木古丽,余岚,等. 新疆喀什地区沙尘暴天气的 时空分布特征及防治措施[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1553 – 1559.]
- [28] Li Yan, Li Hongbin, Wang Lianyou. Analysis on the hydrology and water resources of Gez River in Karakorum Mountain[J]. Arid Zone Research, 2003, 20(4): 272 – 275. [李燕, 李红斌, 王连有. 喀喇昆仑山盖孜河水文水资源特性分析[J]. 干旱区 研究, 2003, 20(4): 272 – 275.]
- [29] Mao Weiyi, Sun Benguo, Wang Tie, et al. Change trends of temperature, precipitation and runoff volume in the Kaxgar River basin since recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2006, 23 (4): 531-538. [毛炜峰, 孙本国, 王铁, 等. 近 50 年来喀什 噶尔河流域气温、降水及径流的变化趋势[J]. 干旱区研究,

2006, 23(4): 531 - 538.]

- [30] Cui Peng, He Yiping, Chen Jie. Debris flow sediment transportation and its effects on rivers in mountain area [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(5): 539 – 549. [崔鹏,何易平, 陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 539 – 549.]
- [31] Han Yongshun, Liang Chuan, Han Jun, et al. Gravitational erosion in afflicted areas and its effects of sediment yield and transportation: a case study in Niujuangou Gully[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(Suppl 2): 110-116. [韩用顺,梁川,韩军,等. 震区重力侵蚀及 其产沙输沙效应研究: 以震中牛圈沟为例[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2012, 44(增刊2): 110-116.]
- [32] Chen Ningsheng, Yang Chenglin, Zhou Wei, et al. Investigation technology for debris flows[M]. Beijing: Science Press, 2011.
  [陈宁生,杨成林,周伟,等. 泥石流勘查技术[M]. 北京:科学出版社, 2011.]

## Analysis of debris flow damage along the China-Pakistan Economic Corridor: taking Aoyitake-Bulunkou Section of the Sino-Pakistan Highway as a case

LUO Wengong<sup>1,2</sup>, WEI Xueli<sup>2,3</sup>, CHEN Baocheng<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, XIE Yongli<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Ürümqi 830046, China; 2. Xinjiang Academy of Transportation Planning, Surveying and Design, Ürümqi 830006, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Debris flows along the Sino-Pakistan Highway have developed with various types and seriously affected the tourism and trade through the China-Pakistan Economic Corridor. Based on morphological features of debris flow gully profiles along the highway, in this paper, the morphological characteristics and activity level of debris flows has been revealed, the causes and hazards of debris flows have been discussed from regional geology, topography, meteorological factors and so on. It is found that the major types of debris flow along Aoyitake-Bulunkou Section of the Sino-Pakistan Highway can be divided into rainfall type (26 gullies) and glacial type (27 gullies). Glacial type debris flow has powerful activity, i. e., the ratio of glacial debris flow shape index  $N \ge 1$  accounting for 81% of the total glacier gullies, and most of them being concave parabolas; rainfall type debris flow has less activity, i. e., the ratio of rainfall debris flow shape index  $N \ge 1$  accounting for 50% of the total glacier gullies shapes being convex parabolas. A large fall, rich material supply and plenty of water supply have significant influence on the development and activity of debris flows. The research results would be useful for debris flow forecast and control along the highway in the China-Pakistan Economic Corridor and be helpful for traffic engineering route selection and debris flow control.

Key words: China-Pakistan Economic Corridor; Sino-Pakistan Highway; debris flow; profile shape; activity

(本文编辑:武俊杰)