

滑坡泥石流与现代河流地质作用关系初探

郑明新

(铁道部科学研究院西北分院)

提要 本文以青衣江干流滑坡、泥石流的发育、分布规律为研究对象,通过与河流地质作用特征的映射分析,论证了滑坡、泥石流发育分布与河流地质形态的关系,并初步提出坡体物质运动、停积模式;进而利用超熵理论探讨了流域及区段流域的稳定性评价方法,对开展区域地质灾害研究提出了新的途径。

关键词 河流地质作用特征 河流窄宽谷 映射分析 超熵

滑坡、泥石流等地质灾害的发育、分布受地层岩性、地质构造、地形地貌及降雨、地震等内外动力地质作用的控制,其中地形地貌是其综合作用的外在表现,而河流外动力地质作用对地形、地貌的变迁起着明显的控制作用。为此本文以青衣江为例,拟从河流地质作用特征(主要表现在河流纵剖面特征和流域平面特征)入手来探讨滑坡、泥石流的发育分布规律。

一、滑坡、泥石流与河流形态特征的关系

河流多由一系列窄宽段相同的串珠状谷盆(山间盆地)所组成,纵剖面表现为陡缓段相间(见图1)。滑坡多发育在窄谷向宽谷过渡地段,泥石流则多发育在河流由宽谷向窄谷过渡地段,在广义坡面上可概化为滑动—流动—停积模式。

1. 青衣江滑坡、泥石流与流域纵剖面映射分析

(1) 映射成果见图2。

图2表明:

① 河床纵比降、岸坡坡度随河流级次(以1/50万地形图为准)的升高而减少,对应滑坡频度有所增加,而泥石流则有所减少。(见表1)

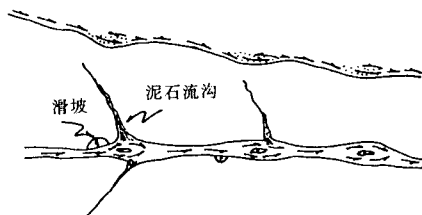


图1 台阶状河谷纵剖面(上)和串珠状窄宽谷平面(下)示意图

Fig. 1 Sketch map of valley vertical section (upper) and its plane (lower)

本文曾得到国家自然科学基金课题“四川西部主要环境工程地质问题”的资助

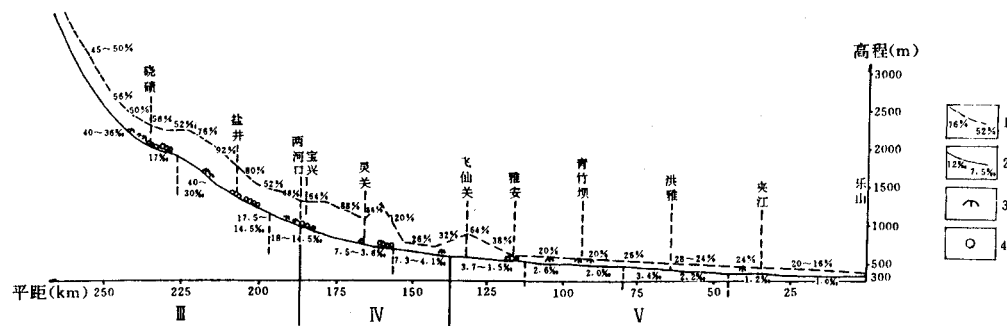


图 2 青衣江滑坡、泥石流与河流纵剖面映射图

Fig. 2 The reflection figure of the river vertical section and the landslides and debris flows in QingYi river

1. 河流两岸岸坡坡度; 2. 河床纵比率; 3. 滑坡 (崩塌); 4. 泥石流

表 1 滑坡、泥石流与河流级次映射成果

Tab. 1 Results of reflection of the river grade and the landslides, debris flows

内容 河流级次	河床纵比降	岸坡坡度	滑坡数	泥石流流数
Ⅱ	14~52‰	50~90%	15	25
Ⅳ	3~18‰	32~110%	7	12
V	1~4‰	14~38%	10	3

表 2 青衣江窄宽谷组成统计一览表

Tab. 2 statistics table of the narrow
and width of QingYi river

中心地带	高差 (m)	长度 (km)	滑坡数	泥石流数
晓碛	1000	40	3	6
盐井	800	30	2	8
宝兴—灵关	460	40	1	8
飞仙关—雅安	170	43	1	3
吴村坝	65	37	3	
洪雅	100	35		
夹江	25	37.5	1	

② 该江由一系列长度约 35

~40km的陡缓河段组成，在平面上表现为一系列串珠状山间盆地，见表2。滑坡多发育在窄谷向宽谷过渡地段。如在硃砂窄谷过渡段，有3处滑坡（崩塌）发育在河床纵比降30~40%、岸坡坡度80~92%的峡谷段，而6处泥石流则发育在河床纵比降13~17%、岸坡坡度56~76%的宽谷地段（偏下游段）；此外飞仙关—雅安窄宽谷过渡段，1处滑坡发育在河床纵比降4~16%、岸坡坡度52~64%的窄谷段，而5处泥石流则发育在河床纵比降2.6~4.2%、岸坡坡度18~34%的宽谷地段。

(2) 映射分析

① 泥石流多发育在平缓地段:

a. 泥石流沟多具复发性(继承性),即多为历史性泥石流沟,使之在沟口迅速堆积(相对地质期而言),久之则成为相对平缓的山间宽谷;

b. 泥石流沟所在位置多处处在串珠状盆地位置, 两岸沟谷出口多, 地形则相对开阔, 岸坡亦缓。通过对该江 27 个点、雅砻江 82 个点河床纵比降—岸坡坡度相关分析已得到了证实, 见表 3。

表 3 河床纵比降—岸坡坡度相关分析成果

Tab. 3 Relationship of vertical riverbed descending and river bank slope

河 流	统计点数	相 关 方 程 式	相关系数 (r)
青衣江	27	河床纵比降 $Y (\%) = 0.04 * X (\text{岸坡坡度} \%) - 0.56$	0.78
雅砻江	82	河床纵比降 $Y (\%) = 0.037 * X (\text{岸坡坡度} \%) + 0.02$	0.83

这即表明河流动力地质作用在形成串珠状窄宽谷的同时亦形成了两岸这种陡缓相间的岸坡。

② 滑坡多发育在河谷陡峻地段：

a. 陡峭岸坡段多为较坚硬岩层，有利于重力势能的储积，为坡体变形破坏的孕育奠定了物质基础；

b. 陡峭岸坡段河床底部处于强烈下切、侧蚀使之临空而沿软弱面发生变形破坏。

③ 河流地质作用特征在很大程度上反映了地层岩性、地质构造、甚至气候特征等。如河流多沿断裂带或软弱岩层发育；堆积型平原河流多受断陷构造控制（如四川安宁河中下游）；侵蚀型山区河流则受构造抬升的影响。

2. 广义坡面灾害的滑动、流动、停积与河床纵比降的关系

掌握坡面灾害的滑动、流动和停积特征，对于研究其防治措施极为重要。下面以青衣江上游两个泥石流沟及坡岸实地调研为依据加以说明；

(1) 柳洛支沟：该沟为柳洛沟一支沟，为坡面型泥石流沟。该沟河床纵比降平均为 438.5‰ (23.5°)。上游形成区平均坡度 > 25°，滑塌段坡度 > 35°；中游流通区为 12°~25°，下游堆积区 5°~8° (<10°)；其上部堆积区亦为 5°~10°，实测平面、剖面图见图 3。

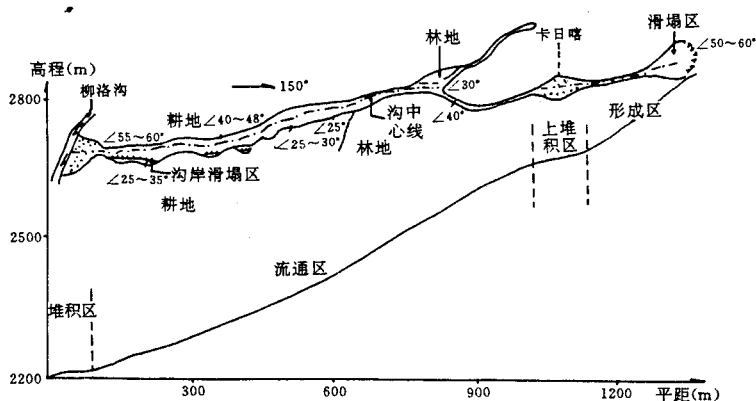


图 3 柳洛支沟实测平面图 (上)、剖面图 (下)

Fig. 3 The plane figure (upper) and the section map (lower) of Liuluo branch valley

(2) 和平沟：该沟为沟谷型泥石流沟，主沟长 7.5km，平均纵比降 173~225‰ (10°~13°)，上游形成区纵比降 220~466‰ (12.5°~25°)，中游流通区 148~250‰ (9.5°~14°)，下游堆积区 75~110‰ (4.5°~7°)。其剖面图见图 4。

从上可以看出：泥石流多发生在坡度 > 15° 的山间沟谷或山坡上形成（滑塌段多出现

在坡度 $>30^\circ$ 的岸坡段),在坡度 $<10^\circ$ 的区域堆积,即在宽缓地带堆积,在携沙量减少时又遭冲刷,再次出现侵蚀沟道(日本水山高久在长30m、宽20cm实验槽上已得到了证实)。

(3) 相应滑坡在非高速远程或非超速下滑,其前部堆积坡度约为 $30^\circ\sim 38^\circ$ 的自然休止角(滑坡启动多沿原始软弱结构面发生,滑体中部多较平缓)。笔者对青衣江上游沿岸崩坡积、滑坡体前部坡度统计结果见表4。

表4 青衣江沿岸崩坡积、滑坡体堆积物坡度一览表(主要为硃磙、陇东两区)
Tab. 4 The gradients of falling, sliding accumulations along QingYi river

坡度区间	$<20^\circ$	$20^\circ\sim 30^\circ$	$30^\circ\sim 40^\circ$	$>40^\circ$
崩滑体(处)	3	10	32	1

通过以上分析可将自然界滑坡、泥石流概化为广义坡面灾害的滑动—流动—停积的破坏模式,见图5。

二、滑坡、泥石流灾害与流域形态超熵的关系

1. 超熵的引入

1988年兰州大学艾南山等人在“再论流域系统信息熵”中证明了斯特拉勒曲线为流域系统内外营力作用大致相等时处于瞬时平衡的形态特征,从而引入了线性平衡态熵来研究流域系统。由于流域系统一般处于远离平衡态的耗散结构,从而在“论流域系统稳定性的判别指标—超熵”(艾南山等,1989)中引入了非线性、非平稳态熵—超熵,即对于一个特定的流域系统,其表达式为:

$$\partial_x P = \frac{-\beta \alpha^3 (\alpha - 1)(\alpha + 1)}{\alpha(-\beta - 1) - 3}$$

式中 α 、 β 为非平衡态时斯特拉勒曲线表达式 $f(x) = (1-x)^\alpha$ 或 $f(x) = (1-x)^{1-\frac{2}{1+\beta}}$ 中的因子 $(\alpha=1-\frac{2}{1+\beta})$ 。

该式表征了河床形态特征及其演化所处的阶段,其中:

- $\partial_x P > 0$, 则表征流域系统稳定,且值越大越稳定;
- $\partial_x P = 0$, 流域处于临界状态;
- $\partial_x P < 0$, 流域系统则不稳定。

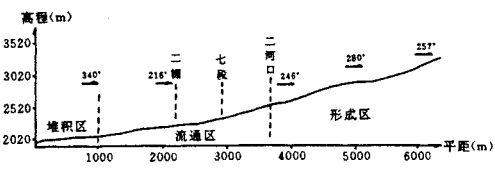


图4 和平沟纵剖面图

Fig. 4 Vertical section of Heping valley

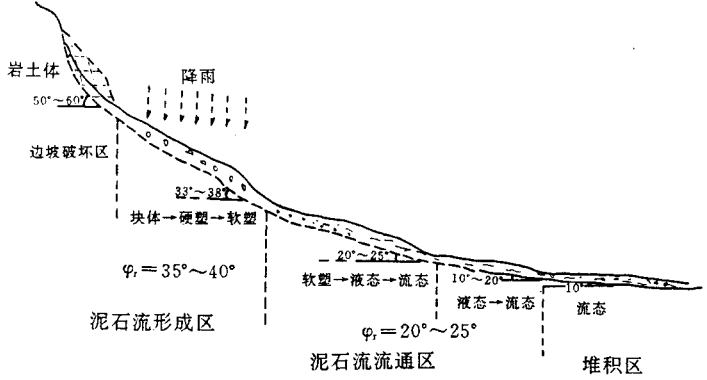


图5 广义坡体破坏模式示意图

Fig. 5 Sketch map showing the failure pattern of generalized slope body

2. 流域形态超熵的分类

首先选择河流条件均一、平面形态为矩形的典型流域来研究。矩形河谷纵剖面方程为：

$$\frac{h}{H} = \left(\frac{l}{L} \right)^N$$

$$\text{对应斯特拉勒曲线为: } \frac{h}{H} = \left(\frac{a}{A} \right)^N = \left(\frac{l}{L} \right)^N$$

式中：

h 、 l 分别为河谷纵剖面上某点与河口间的高差、河长； a 为过该点等高线所圈闭的汇水面积；

H 、 L 、 A 分别为整个流域的高差、河长、流域面积；

N 为河流纵剖面形态指数。

令 $N = \alpha = 1 - \frac{2}{1+\beta}$ ，得 $\beta = \frac{1+N}{1-N}$ ，则矩形流域系统的超熵表达式为：

$$\partial xP = \frac{N^3(N+1)^2(N-1)}{3-N}$$

进而可以求得其他流域形态在产沙、产水均一条件下的超熵为：

① 扇形流域，其斯特拉勒方程为： $\frac{h}{H} = \left(\frac{a}{A} \right)^{\frac{N}{2}}$ ，则其超熵表达式为：

$$\partial xP = \frac{N^3(N^2-4)(N+2)}{32(6-N)};$$

② 栎叶状流域，其斯特拉勒方程为：

$$\frac{h}{H} = \left(\frac{a}{A} \right)^{\frac{2N}{3}},$$

$$\text{超熵 } \partial xP = \frac{N^3(N^2-2.25)(N+1.5)}{7.59375(4.5-N)};$$

③ 扁扇形流域，其斯特拉勒方程为：

$$\frac{h}{H} = \left(\frac{a}{A} \right)^{\frac{N}{3}};$$

$$\text{超熵 } \partial xP = \frac{N^3(N^2-9)(N+3)}{243(9-N)}$$

$N-\partial xP$ 关系曲线及其稳定阶段划分见图6，其中 $\partial xP = -0.151$ 时流域达最不稳定状态； $\partial xP \sim -0.0979$ 时，滑坡、泥石流处于孕育、发展期； ∂xP 为 $-0.0979 \sim -0.151 \sim 0$ 时，滑坡、泥石流频繁发生、处旺盛期； ∂xP 为 $0 \sim 38.85$ 时，滑坡、泥石流发育处衰减期； ∂xP 为 $38.85 \sim +\infty$ 时，流域处相对稳定期。

上述 N 值在封闭系统中表征侵蚀循环的阶段，而在开放系统中则表征内外营力对抗的程度。 N 值较小说明内营力强于外营力， N 值大则表明外营力强于内营力。当内外营力相持平时，广义坡体处临界状态，流域最不稳定。因此用 N 表示的超熵 ∂xP 可用来分析流域的演化规律及其稳定程度。常见各类流域 ∂xP 值及其对应的 N 值见表5。

3. 超熵在青衣江流域稳定性评价中的应用

(1) 青衣江干流

前述将青衣江分为七个窄宽谷段（见图1），提取各段高程 h 、离出口距离 l 及整个河段

高差 H 、河长距离 L ；进而又分出宽谷段、窄谷段。然后在对数坐标上分上述四种形态作回归分析求得 N 值，再据 2.2 中公式求得 ∂xP 值，见表 6。

从表 6 可以看出：

① 就整个青衣江流域而言，采用栎叶状流域适用的评价公式评价较为合适。流域实际平面形态亦栎叶状，且地质灾害发育相对历史期而言逐渐减少，处于相对稳定阶段，即整体上滑坡、泥石流发育处衰退期，($\partial xP(2/3N) = \partial xP(2.059) = 6.683 > 2.8$ ，进入衰退阶段)，但尚未达最终稳定，上游滑坡、泥石流仍较发育。

② 从分段来看，下游宜采用矩形域评判，中上游采用栎叶状域，上游采用扇形域评判。其中：

下游夹江—雅安四个窄宽谷段采用矩形域评价较宜；洪雅(1.25)、吴村坝(0.1247，仅具老滑坡)处于衰退阶段(0, 38.85)，洪雅段相对吴村坝段较稳定；飞仙关—雅安(-0.13179，近 10~20 年多处曾发生滑坡、泥石流，尤其是泥石流灾害)处于相对活跃期；夹江段(-0.108163)由于河流下切，两岸出现陡坡且多为松散堆积体，近年亦有滑坡发生，次于飞仙关—雅安段。

中上游灵关—宝兴、盐井两个窄宽谷采用栎叶状域评价较宜。灵关—宝兴段(-0.1477)、盐井段(-0.151)近年滑坡、泥石流十分发育，处于相对活跃期(-0.0979~-0.151~0)，尤其盐井段，如盐井石门坎县级公路在该处一直处于边坡推病害状态下运营。

上游硃砂段宜采用扇形小流域(以 1/50 万地形图为准，属 III 级流域)来评判，处于活跃阶段(-0.1473)，如该段 1987、1989 和 1990 年连年发生大规模泥石流。

③ 从各窄宽谷段来看，前四个窄宽谷上、下游(即窄段、宽段)宜采用矩形—栎叶状流域，尤以矩形域为主进行评价；而后三个窄宽谷上、下游宜采用栎叶状—扇形域，以栎叶状域为主来评价。通过表 6 可得到：中下游窄宽谷的上游段相对稳定性差(多发生滑坡)，中上游窄宽谷则下游段稳定性差(多发育泥石流)。

(2) 小支流

以前述和平沟和柳洛支沟为例，求得两沟各段 ∂xP 值见表 7。

从表 7 可以看出：

① 和平沟(流域面积 18.5 km²，呈栎叶状)，采用栎叶状域评价较宜，泥石流发生较频繁；对各区段也宜采用栎叶状域评价，结果表明泥石流上游和下游最不稳定，尤其下游堆积、冲刷强烈，更不稳定，而中游则较为稳定。这对铁路等选线都有指导意义。

② 柳洛支沟采用扇形域评价较宜，处于极不稳定阶段(该沟为 1984 年以来在老滑体上溯源冲蚀而成的沟，现流域面积 1.02 km²)，各区段也宜采用扇形域评价。同样是上、下游不稳定，中游亦不稳定(实际流通区既为流通区又为形成区，两岸一直处在滑塌变形状态)，而上游平台卡日喀堆积区则处在相对稳定状态，其堆积速度远不如下游强烈。

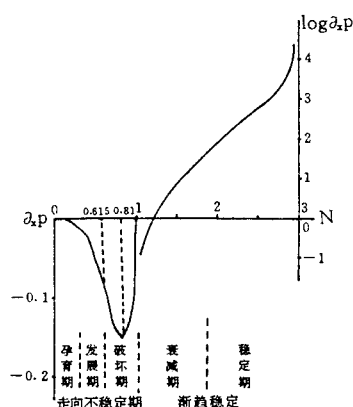


图 6 常见范围 N (矩形)、 ∂xP 值与河流发育阶段

Fig. 6 The scope values of N (rectangle) and ∂xP with the development stage of river

表 5 常见 ∂xP 值与其对应 N 值一览表
Tab. 5 The common values of ∂xP and the corresponding values of N

流域形态	∂xP		2853.88	574.22	72.0	30.48	7.03	0	-0.13	-0.151	-0.109	-0.092	-0.056	-0.012	-0.0004	$\rightarrow 0$
	N	∂xP														
矩形 (N)			2.8	2.5	2.0	1.8	1.5	1.0	0.9	0.81	0.75	0.6	0.5	0.3	0.1	$\rightarrow 0$
栋叶形 (2N/3)			4.2	3.75	3.0	2.7	2.25	1.5	1.35	1.215	1.125	0.9	0.75	0.45	0.15	$\rightarrow 0$
扇形 (N/2)			5.6	5.0	4.0	3.6	3.0	2.0	1.8	1.62	1.5	1.2	1.0	0.62	0.2	$\rightarrow 0$
扁扇形 (N/3)			8.4	7.5	6.0	5.4	4.5	3.0	2.7	2.43	2.25	1.8	1.5	0.9	0.3	$\rightarrow 0$

表 6 青衣江干流 $\partial xP-N$ 分析成果一览表
Tab. 6 The analysis results of $\partial xP-N$ along QingYi River

流域形态	分段	英 江			洪 雅			吴 村 坝			飞仙关—雅安			宝兴—灵关			盐 井			饶 渡			青衣江 流 域
		上 游	下 游	整 段	上 游	下 游	整 段	上 游	下 游	整 段	上 游	下 游	整 段	上 游	下 游	整 段	上 游	下 游	整 段	上 游	下 游	整 段	
∂xP (矩形)		-0.037	0	-0.10816	-0.106	-0.049	1.25	-0.092	-0.0077	0.1247	-0.0834	1.3045	-0.1319	1.8762	10.72	0.6113	-0.15	0.285	1.144	28.85	1.8817	8.5963	91.925
∂xP (栋叶状)		-0.0105	-0.1176	-0.0355	-0.0316	-0.11	-1.506	-0.029	-0.0021	-0.1293	-0.0257	-0.15	-0.0892	-0.144	0.135	-0.1477	-0.0731	-0.1384	-0.151	0.8626	-0.1443	0.0557	6.683
∂xP (扇形)		-0.00425	-0.0562	-0.0146	-0.0142	-0.0519	-0.098	-0.0118	-0.0009	-0.0646	-0.0105	-0.0998	-0.0398	-0.109	-0.15	-0.084	-0.0316	-0.0724	0.0968	0.129	-0.109	-0.1473	-0.1246

表7 和平沟和柳洛支沟 $\partial xP-N$ 分析成果一览表Tab. 7 Analysis results of $\partial xP-N$ in Heping ralley and Liuluo branch valley

沟名	流域形态	下游 (堆积区)	中游 (流通区)	上游 (堆积区)	上游 (形成区)	整个流域
和平沟	矩形 (N)	1.112	0.8472		0.964	1.3936
	栎叶状 (2/3N)	-0.14148	-0.0788		-0.10857	-0.142
	扇形状 (N/2)	-0.0756	-0.03446		-0.0506	-0.128
	扁扇形 (N/3)	-0.023	-0.00978		-0.0146	-0.452
柳洛支沟	矩形 (N)	1.4254	1.20	0.8714	1.3867	1.278
	栎叶状 (2/3N)					-0.146
	扇形状 (N/2)	-0.1334	-0.09216	-0.0375	-0.127	-0.10717
	扁扇形 (N/3)	-0.04852	-0.02894	-0.0107	-0.0447	-0.035

三、主要认识和结论

1. 滑坡、泥石流发育与现代河流地质作用密切相关。河谷形态特征涵有流域稳定性及流域系统演化阶段的丰富信息，它是内外动力地质作用的综合表现；滑坡、泥石流与河谷形态特征有着本质的内在联系，它发育在河谷的特定地段。因此从河流地质作用出发，开展滑坡泥石流与河谷形态映射分析，根据河流纵剖面形态指数 N 并利用超熵理论进行流域稳定性分析是灾害评估的重要手段和有效途径。

2. 映射分析表明，青衣江滑坡常发育在河谷从窄谷向宽谷过渡地段，泥石流常发育在宽谷向窄谷过渡地段，尤在宽谷偏下游端。

3. 通过探讨坡面物质运动、停积与谷坡纵剖面的关系，初步概化为广义坡体破坏模式，是滑坡、泥石流作为体系研究的一个延伸，值得做进一步的实地研究。

4. 文中尝试采用超熵理论对大流域进行分段系统研究，并取得一定效果。研究表明，大流域稳定性评价宜采用栎叶状域或矩形域；分段评价应区别对待，中下游段采用栎叶状域，中上游段则采用栎叶状或扇形域评价（具体仍要根据其平面形态）；对小支流则需根据其平面形态采用栎叶状或扇形域评价，进行区段研究可确定侵蚀、堆积的最不稳定地段，以便在选址、选线中避开不稳定地段。

研究中也发现有待探讨的问题：

a. 表征流域演化过程 N 值仅表征了流域的河谷形态特征，尚不能直接结合降水，人为活动等因素进行综合评价；

b. 流域超熵稳定性评价采用的流域形态及分段评价的分割密度都值得进一步研究。

本文曾得到成都理工学院王兰生教授的悉心指导，铁科院西北分院王恭先研究员也提出了宝贵的修改意见。借此一并表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- [1] 艾南山，侵蚀流域系统的信息熵. 水土保持学报，1卷2期，1987.
 - [2] 岳天详，艾南山等，论流域系统稳定性的判别指标—超熵. 水土保持学报，3卷2期，1989.
- (下转第65页)

ANALYSIS ON THE FORMATION MECHANISM AND THE DEVELOPMENT STAGES FOR THE LAND- SLIDES OF CUT SLOPES IN CRACKED AND EXPANSIVE SOIL

Sun zhiwei

(Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower)

Abstract

Based on large amount of investigation data for the cracked and expansive soil landslides, considering from the microstructure and engineering geological characteristics of expansive soil, groundwater action and environmental factors, this paper analysed and discussed the formation mechanism and the development stages of the cracked and expansive soil landslides

Key words: cracked and expansive soil, landslide, formation mechanism, development stages

(上接第47页)

[3] 郑明新,四川西部崩(塌)、滑(坡)、(泥石流)流地地质灾害信息系统.成都地质学院研究生论文,1992.

[4] 蒋忠信,泥石流流域系统的超熵.中国地质灾害与防治学报,第3卷第1期,1992.

RUDIMENTARY STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN LANDSLIDES, DEBRIS FLOWS AND PRESENT GEOLOGICAL PROCESSES OF RIVER

Zheng Mingxin

(Northwest Branch, Academy of Railway Sciences)

Abstract

This paper takes the development and distribution regularity of landslides, debris flows in Qing Yi River as study object. By means of reflection analysis, the relationship between hazards and the river geological characters are discussed, and then sets up the model of mass motion, stopping of slope materials. In addition, on the basis of utilizing superentropy—theory, the assessment method of stability on the total or sectional valley are probed. Thus puts forward a new way for studying of regional geological hazard.

Key words: present geological processes of river, narrow and width valley of river, reflection analysis, superentropy