

# 青藏高原东缘第四纪泥石流沉积物地球化学分析

魏东岚, 李永化

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

**摘要:**以甘肃武都地区、云南小江流域发育的泥石流流体为研究对象,采用地球化学元素分析方法,分析不同地区,不同时代泥石流流体中化学元素的分布、分配、迁移和富集的规律,并对泥石流沉积物中的硅铝系数( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ )、 $\text{CaCO}_3$ 含量、pH值、有机质含量所反映的气候变化特点进行了探讨。结果表明:第四纪泥石流的地球化学特征有别于其它类型的第四纪沉积物;青藏高原东缘第四纪泥石流流体中 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、有机质含量表现为时代越老含量越高,而 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量则表现为时代越老含量越低;硅铝系数表现为时代越老越高,显示了第四纪时期该地区气候波动的总体趋势是干燥程度逐渐增加。研究结果对分析青藏高原的阶段性的隆升具有一定的借鉴意义。

**关键词:**青藏高原;第四纪;泥石流沉积物;地球化学

中图分类号:P534.63;P642.23

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0292-07

## The Geochemistry Analysis of the Debris Flow Sediment in the Quaternary at the Eastern Fringe of Qinghai-Tibetan Plateau

WEI Dong-lan, LI Yong-hua

(College of Urban and Environment Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

**Abstract:** The debris flow of the Wudu region in Gansu and Xiaojiang River Basin in Yunnan was taken as study Sites. By geochemical analysis, the chemical elements distribution, allocation and migration of chemical elements in debris flow in different times at different areas were investigated. Then the characteristics of climate change which influenced by the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , the content of  $\text{CaCO}_3$ , pH and organic matter in the sediment of debris flows were analyzed. The results showed that the geochemistry features of debris flow in Quaternary were distinct from other types of sediment. With the ages varying from oldness to youth, the content of  $\text{SiO}_2$ , the content of  $\text{CaCO}_3$  and organic matter changed from high to low values, whereas the content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and the content of  $\text{K}_2\text{O}$  increased. The  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  in debris flow became low from old to new ages, which showed that the tendency of climatic change became dry in this regional of Quaternary period. This result have some referential significance for the analysis of the uplift of Tiber.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; Quaternary; debris-flow sediment; geochemistry

泥石流沉积物是在第四纪地质过程和特定的地质环境中所形成的产物,为第四纪沉积物的一种。泥石流沉积物可为认识和说明一个地区第四纪时期岩石、地层、古地理和地球化学问题提供重要的依据。泥石流沉积体中包含有其形成的条件信息,这些条件决定了泥石流沉积物中化学元素和化合物的分布。目前我国第四纪沉积物地球化学研究,主要集中在黄土沉积、湖泊沉积、海洋沉积、河流沉积、冰川沉积、洞穴堆积、风化壳等几种类型的沉积物中,泥石流沉积物作为第四纪的一种特殊沉积类型,物质的风化、搬

运及堆积过程中与其它类型的沉积物有很大差别。目前我国泥石流的研究朝着内容多样化和定量化方向发展,研究内容多集中于区域泥石流及泥石流发育环境的研究、泥石流沉积学的研究、泥石流力学特征和运动过程研究以及泥石流发育史与环境变迁研究,并积累了许多具有重要学术价值的研究成果<sup>[1-3]</sup>。而对第四纪古泥石流流体中不同化学成分含量和元素积聚、迁移特征及迁移强度涉及较少。

青藏高原东部边缘是我国暴雨泥石流发育最剧烈的地带,这里地层多经受强烈的褶皱和断裂,新构

收稿日期:2011-12-29

修回日期:2012-06-12

资助项目:国家重点基础研究发展规划“青藏高原形成演化及其环境、资源效应”(G1998040800)

作者简介:魏东岚(1972—),男,河南开封人,副教授,主要从事气候与环境灾害研究工作。E-mail:wei\_dl@163.com

造运动强烈,谷坡陡而不稳定,加之经常发生岩体崩塌与滑坡、沟谷中松散固体物质丰富,同时多受东南及西南季风的影响,第四纪以来这里沉积了巨厚的泥石流地层。本研究通过对青藏高原东部边缘地区最具代表性、泥石流发育最严重(爆发频繁、强度大)的白龙江流域、小江流域古泥石流发育特性进行研究,结合现代泥石流发育的环境<sup>[4-5]</sup>,为系统研究第四纪泥石流沉积物的地球化学特征提供依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 云南小江流域

小江流域位于云南省东南部泸西县,东经 $103^{\circ}32'$ — $104^{\circ}00'$ ,北纬 $24^{\circ}12'$ — $24^{\circ}45'$ ,面积 $1\,034\text{ km}^2$ ,流域内最低点海拔 $690\text{ m}$ ,最高点海拔 $4\,344.10\text{ m}$ ,相对高度 $3\,654.10\text{ m}$ 。小江流域气候为旱、雨两季分明的亚热带高原季风气候,多年平均气温 $15.2^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量 $966.8\text{ mm}$ ;地貌类型由山间盆地和盆周山地组成,形成高山、河谷相间,平坝、丘陵交错的地形格局;土地利用以耕地和林地为主。受地形和气候因素的影响,晚新生代以来这里的泥石流极为发育,在小江河谷两岸保存有大量第四纪泥石流活动留下的堆积物。到目前小江流域仍是我国泥石流最为发育的地区之一,两岸有大型泥石流沟 $38$ 条,每到暴雨季节,各沟泥石流纷纷爆发,造成巨灾。

### 1.2 甘肃白龙江流域

白龙江流域属陇南山区南秦岭山系西段(北纬 $34^{\circ}$ 以南),包括白龙江和西汉水中下游地区,属长江水系嘉陵江上游,地处青藏高原东缘,西秦岭与岷山脉交汇地区,属青藏高原向黄土高原过渡的斜坡急剧变形带。区内山峦重叠,山峻谷深,沟壑纵横,谷道狭窄,坡陡流急。总体地势自西北向东南倾伏,最高点为迭山,海拔 $4\,920\text{ m}$ ,最低为南部中庙乡,海拔 $550\text{ m}$ 。地貌类型包括山地地貌、河谷地貌、黄土地貌、重力地貌等。白龙江上游一般都有温凉、湿润、冬寒、夏凉的高山气候特点,为温带湿润气候区;中游属暖温带湿润气候区;而下游属北亚热带湿润气候区。白龙江流域从南到北,由于纬度、海拔高度和气候的不同,呈现出从亚热带、温带至寒温带的森林植被垂直带谱。

## 2 样品的采集与测试

本研究选取小江流域的蒋家沟附近及白龙江流域武都附近晚更新世八个不同时代具有代表性的泥石流剖面进行系统采样与测试分析。泥得坪台地为—基座台地,位于蒋家沟沟口北侧,大庆沟沟口南侧,

台面海拔高 $1\,350\text{ m}$ 左右,剖面厚 $127\text{ m}$ ,ESR年龄 $137\sim 121\text{ kaBP}$ <sup>[6]</sup>,自下而上等间距采取供试样品 $4$ 个,分别命名为NDP①—NDP④。李家箐剖面位于新村北麻栗坪电站附近,为一山前泥石流扇形地,由于后期河流的下切作用形成天然的剖面,整个剖面厚约 $35\text{ m}$ ,分上下两个层位,中间为一个角度不整合面,上下两个层位各采集供试样品 $1$ 个,同时采取 $2$ 个热释光样品,热释光测试结果表明,不整合面下部地层形成于 $0.61\text{ MaBP}$ 以前,不整合面上部地层形成于 $82.87\text{ kaBP}$ 以前。达朵台地位于蒋家沟沟口对面的小江西岸,台面高程约 $1\,240\text{ m}$ ,为一堆积台地,地层出露厚度为 $190\text{ m}$ ,ESR年龄在 $92\sim 14\text{ kaBP}$ 之间<sup>[6]</sup>。从沉积上看,主要有泥石流沉积、冲积扇漫流沉积和扇面河道沉积,其中泥石流沉积构成了台地的主体。整个剖面自下而上等间距采取供试样品 $7$ 个,分别命名为DD①—DD⑦。位于新村盆地边缘的山脚台地是中更新世泥石流堆积台地,保存有中更新世泥石流活动留下的堆积物<sup>[7]</sup>,山脚采样点自下而上等间距采取供试样品 $4$ 个,分别命名为SJ②—SJ⑤。马槽沟采样点位于甘肃省武都县东北 $13\text{ km}$ 处,命名为MCG。剃头坡采样点位于舟曲县城东山顶,命名为TTP。柏林寺采样点位于武都县城附近白龙江对岸三河沿岸,整个剖面分上下两个层位,上下两个层位各采集供试样品 $1$ 个,命名为BLS底、BLS顶。泉家沟采样点位于陇南市区后山,整个剖面分上下两个层位,上下两个层位各采集供试样品 $1$ 个,命名为QJG底、QJG顶。本文化学分析由原中国科学院地理研究所中心实验室完成,热释光年代由国家地震局地质研究所测定。

## 3 第四纪泥石流沉积物地球化学元素测试结果

### 3.1 泥石流沉积物的化学成分

化学分析结果表明,云南小江流域泥石流沉积物基质中的主要化学元素(以氧化物表示)有: $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ 和 $\text{TiO}_2$ 等(表1)。小江流域中更新世以来除锰、钛氧化物含量较低且稳定外,其它 $8$ 种元素含量变化均较大: $\text{SiO}_2$ 含量变动于 $21\%\sim 57.08\%$ ,其中以 $48.68\%\sim 54.54\%$ 含量频率最高,超过 $80\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量变动于 $4\%\sim 24.39\%$ ,其中以 $20\%\sim 23\%$ 含量频率最高,超过 $80\%$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为 $2.35\%\sim 13.71\%$ ,多介于 $9\%\sim 11\%$ ;  $\text{CaO}$ 含量变化幅度大,以 $0.01\sim 0.14$ 出现的频率最高;  $\text{MgO}$ 变化于 $13.13\%\sim 1.96\%$ ,绝大多数的含量小于 $4\%$ 。  $\text{K}_2\text{O}$ 为 $0.90\%$

~4.95%，以 3.6%~5% 含量频率最高；Na<sub>2</sub>O 变化于 0%~0.15%，绝大多数的含量小于 0.1%。

与小江流域相似，甘肃白龙江流域泥石流沉积物基质中的主要化学元素（以氧化物表示）以 SiO<sub>2</sub>，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，K<sub>2</sub>O，MgO 为主，此外还有微量的 Na<sub>2</sub>O，MnO，TiO<sub>2</sub>，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等（表 2）。各种元素的含量

波动幅度也较大：K<sub>2</sub>O 为 2.56%~4.21%，呈现出有规律性的变化；MgO 变化于 2.07%~3.57%；SiO<sub>2</sub> 含量波动于 64.05%~49.26%，除早更新世的剃头坡剖面（TTP）外，含量多在 50.27~49.26%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 15.59%~24.49%，以 22%~24% 出现的次数最多；Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 变动于 6.29%~13.2%。

表 1 云南小江流域泥石流沉积物化学元素全量分析

时代	样号	烧失量	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>
Q <sub>2</sub>	LJJ①	33.15	21.70	0.40	2.35	4.00	24.58	13.13	0.90	0	0.07	0.23
	SJ②	6.59	57.08	0.15	9.38	18.95	0.08	3.35	3.61	0.07	0.03	0.68
	SJ③	7.04	53.74	0.14	8.87	21.26	0.13	3.59	3.98	0.09	0.03	0.77
	SJ④	6.69	54.54	0.17	9.49	20.67	0.14	3.42	3.70	0.11	0.03	0.77
	SJ⑤	7.06	53.02	0.14	9.53	20.67	0.14	3.54	3.85	0.11	0.04	0.80
Q <sub>3</sub>	NDP④	5.88	52.59	0.26	9.05	23.14	0	2.70	4.80	0.08	0.12	1.25
	LJJ②	5.90	50.88	0.26	10.76	23.12	0.01	2.32	4.73	0.03	0.21	1.18
	DD①	8.72	48.68	0.15	13.71	19.65	0.67	4.43	1.77	0.14	0.12	1.71
	DD②	6.06	50.94	10.84	22.66	0.03	2.48	4.79	0.05	0.26	1.14	
	DD③	5.98	51.56	0.17	10.09	22.72	0.04	2.44	4.48	0.05	0.23	1.14
	DD④	5.91	51.43	0.14	10.16	23.01	0.01	2.46	4.95	0.04	0.24	1.14
	DD⑤	6.11	51.93	0.16	10.07	23.10	0.02	2.37	4.79	0.06	0.27	1.16
	DD⑥	6.55	50.41	0.18	11.00	22.63	0.02	2.38	4.78	0.04	0.33	1.13
	DD⑦	7.78	49.70	0.16	1.35	24.39	0.03	1.96	4.00	0.15	0.14	1.18

表 2 甘肃武都地区泥石流沉积物化学元素全量分析结果

时代	样品编号	烧失量	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>
Q <sub>1</sub>	TTP	6.95	64.85	0.17	6.29	15.59	0.15	2.07	2.65	0.09	0.01	0.58
	QJG 底	7.00	50.09	0.41	12.99	21.78	0.09	2.76	3.34	0.18	0.17	0.96
Q <sub>2</sub>	QJG 顶	6.95	49.64	0.40	13.20	21.50	0.11	2.94	3.35	0.25	0.21	0.99
	QJG	6.52	51.63	0.13	11.05	22.66	0.15	3.53	3.48	0.30	0.08	0.79
Q <sub>3</sub>	QJG-1	5.67	49.26	0.21	11.38	24.39	0.09	3.41	4.21	0.39	0.07	1.06
	QJG-2	5.46	50.27	0.21	10.90	23.34	0.16	3.57	3.94	0.47	0.13	0.92

3.2 第四纪泥石流沉积物中的 CaCO<sub>3</sub>

云南小江流域中更新世早期李家箐(LJJ)扇形地底部泥石流体基质中 CaCO<sub>3</sub> 含量高达 69.80%；中更新世中期的山脚(SJ)剖面泥石流体基质中 CaCO<sub>3</sub> 含

量在 41.785%~49.503%；晚更新世的达朵台地(DD)泥石流体基质中 CaCO<sub>3</sub> 和含量只有 17.24%~10.163%（表 3）。

表 3 云南小江流域第四纪泥石流沉积物基质中 CaCO<sub>3</sub> 含量

样品名	LJJ①	SJ②	SJ③	SJ④	SJ⑤	NDP①	NDP②	DD①	DD②	DD③	DD⑤	DD⑥	DD⑦
CaCO <sub>3</sub>	68.80	41.79	46.40	47.26	49.50	26.00	12.42	15.05	12.05	10.61	17.24	11.63	12.89

表 4 白龙江流域第四纪泥石流沉积物中 CaCO<sub>3</sub> 含量 %

样品名	TTP	QJG 底	QJG 顶	MCG	BLS①	BLS②
CaCO <sub>3</sub>	70.98	15.03	14.75	11.586	7.895	9.946

甘肃白龙江流域早更新世的舟曲剃头坡(TTP)剖面泥石体基质中 CaCO<sub>3</sub> 的含量高达 70.982%，中更新世的泉家沟(QJG)及马槽沟(MCG)剖面泥石流体基质中 CaCO<sub>3</sub> 含量为 15%~11.586%；晚更新世的柏林寺(BLS)剖面泥石流体基质中 CaCO<sub>3</sub> 的含量

只有 9.946%~7.895%（表 4）。

3.3 第四纪泥石流沉积物的酸碱度及有机质

小江流域泥石流沉积物的 pH 值相对稳定，变化在 9.42~8.34 之间，呈碱性（表 5），代表末次冰期时泥石流沉积的达朵剖面(DD)PH 值偏高，在 9.0 以上。白龙江流域泥石流沉积物早更新世与晚更新世泥石流体的 pH 值偏高，一般大于 9.0，中更新世泥石流体的 pH 值偏低（表 6）。

表 5 小江流域泥石流沉积体中 pH 值

样品号	SJ②	SJ③	SJ④	SJ⑤	DD①	DD②	DD③	DD⑤	DD⑥	DD⑦	NDP①	NDP②
pH 值	8.98	8.82	8.79	8.63	9.25	9.26	9.42	9.00	9.08	8.34	9.61	8.96

表 6 白龙江流域第四纪泥石流堆积体的 pH 值

样品名	TTP	QJG 底	QJG 顶	MCG	BLS①	BLS②
pH 值	9.85	8.9	8.74	8.49	8.93	9.44

小江流域中更新世泥石流流体中有机质含量较高,

晚更新世泥石流流体中有机质的含量低(表 7);白龙江流域早更新世泥石流流体中有机质含量高达 0.305%,中更新世泥石流流体中有机质含量中等,晚更新世泥石流流体中有机质含量最少(表 8)。

表 7 小江流域泥石流流体中的有机质含量

%

样品号	LJJ①	SJ②	SJ③	SJ④	SJ⑤	NDP①	NDP②	DD①	DD②	DD③	DD⑤	DD⑥	DD⑦
有机质	0.208	0.214	0.13	0.19	0.21	0.14	0.15	0.13	0.18	0.15	0.23	0.31	0.58

表 8 白龙江流域泥石流流体中的有机质含量

### 3.4 泥石流堆积物中的可溶盐含量

Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> 及 Na<sup>+</sup> 在各时代泥石流流体中含量变化幅度较大,规律性不强,详见表 9。

样品名	TTP	QJG 底	QJG 顶	MCG	BLS①	BLS②
有机质	0.305	0.19	0.187	0.161	0.162	0.157

表 9 云南小江流域泥石流流体中可溶盐分析结果

%

时代	样号	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup>	计算合盐	
Q <sub>2</sub>	SJ②	0.037	0.020	0.0334	0.006	0.007	0.024	0.1274	
	SJ③	0.003	0.0204	0.358	0.0114	0.0008	0.0153	0.1235	
	SJ④	0.051	0.024	0.023	0.013	0.0058	0.0198	0.1359	
	SJ⑤	0.0327	0.0212	0.0633	0.025	0.007	0.014	0.1635	
末次间冰期	NDP①	0.044	0.018	0.014	0.005	0.0061	0.018	0.105	
	NDP④	0.467	0.025	0.016	0.004	0.006	0.0255	0.1223	
Q <sub>3</sub>	LJJ②	0.039	0.020	0.0131	0.008	0.003	0.0199	0.1028	
	DD①	0.044	0.018	0.014	0.005	0.0061	0.018	0.105	
	DD②	0.467	0.025	0.016	0.004	0.006	0.0255	0.1223	
	DD③	0.039	0.0176	0.019	0.0025	0.0049	0.0232	0.1063	
	末次冰期	DD⑤	0.039	0.0225	0.0203	0.0065	0.008	0.0166	0.1128
	DD⑥	0.033	0.016	0.0299	0.006	0.009	0.014	0.1077	
	DD⑦	0.034	0.096	0.394	0.124	0.054	0.019	0.7213	

## 4 第四纪泥石流沉积物化学元素成分分析

### 4.1 泥石流沉积物化学元素全量分析

泥石流沉积物基质中的 SiO<sub>2</sub> 主要来自易于溶解的硅酸盐<sup>[1]</sup>(如橄榄石、辉石、角闪石等),沉积体的表层水、氧和碳酸都是促使硅酸盐矿物和石英分解的重要因素<sup>[2]</sup>。一般认为,在热带、亚热带湿润炎热的气候条件下,沉积物及岩石表层经风化作用形成的黏土矿物还要进一步发生红土化作用,这种作用主要是使黏土矿物再度分解<sup>[2]</sup>,使其中的铝和硅分离,硅氧被地下水带走,而铝则相对富集。这种作用过程的必要条件是要使黏土矿物充分分解的热力条件和使 SiO<sub>2</sub> 被带走或稀释的充足雨量。对泥石流沉积体表层而言,可能存在这种过程,而对厚达几十米或上百米的巨厚泥石流沉积体的内部而言,无论是热力条件还是水力条件都不能达到上述要求,相反表层被稀释带走的 SiO<sub>2</sub> 随着地下水向下渗透,在泥石流流体内部

重新聚合为黏土沉淀。气候越湿热,硅酸盐矿物分解的越快、表层淋失的越多,泥石流流体内部 SiO<sub>2</sub> 沉淀的也就越多,因而呈现出了与风化壳及土壤层相反的变化规律。

铝的氧化物基本不溶于水,在各种表生作用中,铝不易进行远距离的迁移,所以就一个地区而言,铝的氧化物具有明显的继承性。泥石流的物源主要来自前期的各种第四纪松散沉积物(如泥石流沉积、风化壳、河流沉积物等),这些沉积物中所含的铝的氧化物往往被继承下来,在不断累积过程中,越到后期,泥石流沉积物中铝的氧化物含量也就越高。

泥石流沉积物中主要化学元素含量在不同地区及不同时代剖面上的变化显示出一定的规律性:泥石流流体中 SiO<sub>2</sub> 含量表现为时代越老含量越高,中间具有一定的波动性。云南小江流域山脚剖面底部(SJ②)泥石流流体(TL > 0.296 MaBP) SiO<sub>2</sub> 含量为 57.08%;达朵剖面顶部(DD)泥石流流体(ESR = 0.014 MaBP) SiO<sub>2</sub> 含量只有 49.70%;甘肃白龙江流域舟曲

剃头坡剖面 (TTP) (早更新世)  $\text{SiO}_2$  含量高达 64.85%; 马槽沟剖面 (MCG) 泥石流流体 (0.5 MaBP 左右)  $\text{SiO}_2$  含量为 51.63%; 柏林寺剖面 (BLS) 泥石流流体 (晚更新世)  $\text{SiO}_2$  含量只有 50.27%。

$\text{Al}_2\text{O}_3$  含量与  $\text{SiO}_2$  含量相反, 表现为时代越老含量越低, 云南小江流域山脚剖面 (SJ) 底部泥石流流体 (TL > 0.29 Ma) 中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量只有 18.95%; 泥得坪底部 (NDP) 泥石流流体中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 23.14%; 达朵剖面 (DD) 顶部泥石流流体中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量可达 24.39%。甘肃白龙江流域舟曲剃头坡剖面 (TTP) 泥石流流体 (早更新世) 中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量只有 15.59%; 马槽沟剖面 (MCG) 泥石流流体中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 22.66%; 柏林寺剖面 (BLS) 泥石流流体中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量高达 24.39%。

$\text{K}_2\text{O}$  含量, 在小江流域泥石流流体中  $\text{K}_2\text{O}$  的含量为 0.90%~4.95%, 平均为 3.962%。从时代上来看, 中更新世山脚剖面 (SJ) 泥石流流体中的  $\text{K}_2\text{O}$  平均含量为 3.74%, 晚更新世末冰期时期堆积的达朵台地 (DD) 泥石流流体中  $\text{K}_2\text{O}$  的平均含量 4.692%, 高于山脚剖面。甘肃白龙江流域泥石流流体中  $\text{K}_2\text{O}$  的平均含量为 3.495%, 早更新世的泥石流流体中的含量为 2.65%, 中更新世泥石流流体中的平均含量为 3.39%, 晚更新世泥石流流体中的平均含量为 4.075%, 白龙江流域与小江流域不同时代泥石流流体中  $\text{K}_2\text{O}$  的含量具有相同的变化特征。即时代越老  $\text{K}_2\text{O}$  含量越低, 时代越新  $\text{K}_2\text{O}$  的含量越高。

#### 4.2 $\text{CaCO}_3$ 含量分析

泥石流流体中  $\text{CaCO}_3$  含量高是青藏高原东部边缘地区泥石流沉积物的显著特征之一, 由于碳酸盐的存在使不同时代的泥石流沉积物具有不同的胶结状态。泥石流沉积物基质  $\text{CaCO}_3$  含量变化同样也反映了泥石流形成时的古气候特征, 与区域内其它类型的第四纪沉积物 (如黄土等) 相比, 泥石流沉积  $\text{CaCO}_3$  含量较高, 波动范围也较大。从纵向的分布特征来看, 时代越老的泥石流流体中  $\text{CaCO}_3$  的含量越高, 越新含量越低。

从横向分布特征来看, 同一时代, 处于温湿气候区的小江流域泥石流流体基质中的  $\text{CaCO}_3$  含量要远比处于干旱一半干旱地带的白龙江流域泥石流流体基质中的含量高; 从时代上来看, 泥得坪剖面 (NDP) (ESR = 0.137~0.121 MaBP) 与达朵剖面 (DD) (ESR = 0.092~0.013 MaBP) 分别代表了末次冰期旋回末次间冰期与末次冰期阶段小江流域的泥石流沉积特征。剖面中  $\text{CaCO}_3$  的含量具有一定的波动性, 代表末次间冰期时期温暖湿润气候条件下泥石流沉积物特征, 泥得坪剖面 (NDP) 与达朵剖面的底部 (DD①)  $\text{CaCO}_3$

含量高; 代表末次冰期寒冷偏干气候时期泥石流沉积特征的 DD②—DD⑦  $\text{CaCO}_3$  含量低, 中间仍有一定的波动性。泥石流流体中  $\text{CaCO}_3$  在纵向及横向上的含量变化规律, 我们可以发现气候温暖、湿润,  $\text{CaCO}_3$  含量高; 气候寒冷干燥时,  $\text{CaCO}_3$  含量低。  $\text{CaCO}_3$  含量的这种变化规律与封闭湖相地层中  $\text{CaCO}_3$  含量的变化很相似, 但形成机制却不相同。

泥石流流体中  $\text{CaCO}_3$  主要来源于从源区搬运来的碎屑碳酸盐岩, 在气候较温暖湿润的时期, 泥石流沉积体顶部古土壤发育, 泥石流表层的碎屑方解石及灰岩开始被大量溶解淋滤, 这些在表层溶解的碎屑方解石、灰岩, 以溶解的  $\text{CaCO}_3$  形式被地下水带到泥石流流体内部, 尔后, 随着水体逐渐被蒸发, 水中的  $\text{CaCO}_3$  残留在土体中, 并在那里开始淀积富集, 因而时代越老, 淀积的时间越长,  $\text{CaCO}_3$  的含量就越高, 气候越温暖湿润、降水越多,  $\text{CaCO}_3$  的含量也就越多。泥石流流体中  $\text{CaCO}_3$  的含量有两个方面的指示意义: 一是指示泥石流形成的时代, 青藏高原东部边缘地区第四纪时期堆积的泥石流流体沉积中  $\text{CaCO}_3$  的含量早更新世为 70% 左右, 中更新世一般为 20%~40%, 晚更新世一般为 10%~17%, 呈现出明显的规律性变化; 二是对气候的指示意义, 如达朵剖面 (DD)  $\text{CaCO}_3$  含量高低的节奏性变化, 反映了末次冰期以来小江流域多次干湿、冷暖的气候波动。小江流域与白龙江流域在同一时期 (如中更新世) 形成的泥石流堆积物中  $\text{CaCO}_3$  含量上的差别, 反映了这两个地区在气候方面的巨大差别。

#### 4.3 有机质含量分析

有机质是一定生物气候条件下的产物, 其含量和性质都与环境有关, 泥石流物质在源区及沉积区必然经受了各种风化和成土作用, 同时也伴随有各种高等和低等的生物活动。各种动、植物的机体、组织及分泌物、排汇物等都是泥石流流体中有机物的原始来源, 受气候和生物条件的影响, 不同时代及不同地区的泥石流沉积物中有机质的含量也呈现出一定的差异 (表 7—8)。

有机质是特定气候条件下的产物, 气候温暖湿润, 自然植被生长好, 有利于有机质的产生和积累。反之, 气候干燥寒冷, 自然植被生长不良, 有机质相对贫乏。早更新世气候温暖、湿润, 植被生长良好, 因而泥石流流体中有机质的含量高。到了中更新世, 随着青藏高原隆起至 3 000 m 的高度<sup>[8]</sup>, 西南暖湿气候受阻, 我国内陆继续向干旱方向发展, 在白龙江流域开始出现离石黄土沉积, 自然植被生长不良, 因而这一时期的泥石流流体中有机质含量与早更新世相比明显

降低。进入晚更新世,随着青藏高原隆起至 4 000 m 以上<sup>[9]</sup>,再加上末次冰期的来临,内陆地区的降水量明显减少,植物生长受到很大限制,因而这一时期的泥石流沉积物中有机质的含量也随之明显减少。有机质的含量不仅取决于植物生长状况,还取决于当时的温湿条件,气温高、湿度大,有机质腐烂快;反之,有机质腐烂慢。因而在利用有机质含量推测环境时,只能在同一类型的环境中进行比较。

#### 4.4 可溶盐分析

泥石流沉积作用包括风化、侵蚀、搬运、沉积等过程,这些过程相互相关,而不是独立进行的,泥石流流体的组成和性质与气候和物源组成有关。组成泥石流固体物质的岩石几乎是不溶于水的,但经风化作用后,形成的碎屑物与易溶的盐类随即以离子或次生硅酸盐的形式溶于水中。原始的泥石流浆体中的固体物质,含有大量的黏粒(0.005~0.000 5 mm),这些黏粒均由黏土矿物组成,更细的部分为胶体,黏粒和胶体均带负电荷,吸附水中的阳离子,随着泥石流流体中的水分的不断被蒸发,相应的电解质浓度不断增加,当增加到一定程度时,就会析出可溶盐类而粘附于颗粒表面,整个失水过程对其成分和含量影响不大,随着可溶盐的迁移,各层位的可溶盐含量却发生了明显的变化。因而泥石流流体中可溶盐的含量受物源的化学风化程度,黏粒含量的多少,水体中电解质的浓度以及当地气候条件,顶部沉积物等诸多因素的影响(表 9)。

$\text{HCO}_3^-$  变化于 0.051%~0.003%,有由老到新逐渐增加的趋势,代表末次间冰期时期的泥石流沉积

LJJ②及 NDP①NDP④剖面中  $\text{HCO}_3^-$  的含量与代表末次冰期沉积的 DD①—DD⑦剖面中  $\text{HCO}_3^-$  相比含量明显减少。

$\text{Cl}^-$  变化于 0.007%~0.096%。岩石经风化后氯离子游离,从岩石中释出,由于  $\text{Cl}^-$  溶解度大,具有很强的迁移性不能形成难溶矿物,不被胶体所吸附,也不被生物所积累,因而易被流水带走,所以气候温和、降水量增加, $\text{Cl}^-$  易于被淋滤,为流水带走,泥石流流体中  $\text{Cl}^-$  含量减少(如末次间冰期时期沉积 NDP①、NDP②)。

在土壤中氯的含量受气候条件的影响,在干旱及干旱季节,氯常集中在表土或近表土带,小江流域晚更新世受构造运动的影响,地形高差不断加大,典型的干热河谷已经形成,因而在泥石流流体表层(如 DD⑦),氯的含量急剧增大,达 0.096%。

$\text{SO}_4^{2-}$ :硫酸根离子也具有很强的迁移能力,黏粒与胶体几乎不能阻留,在潮湿的气候条件下,土壤很难保存硫酸盐,大部分被淋滤到河流内,搬运到海洋中,在干旱和半干旱的气候条件下,大部分硫酸盐仍保存在土壤中,因而间冰期湿润气候条件下形成的泥石流堆积物中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量偏低,而冰期时形成的泥石流沉积物中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量偏高。

## 5 第四纪泥石流沉积物化学元素迁移特征分析

硅铝系数常用来表征化学元素迁移强度,本文选取硅铝系数,详细计算不同时代泥石流沉积物的化学元素迁移特征值(表 10—11)。

表 10 云南小江流域泥石流沉积物化学元素迁移特征值

样品号	LJJ①	SJ②	SJ③	SJ④	SJ⑤	NDP④	LJJ②	DD①	DD②	DD③	DD⑤	DD⑥	DD⑦
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	9.22	5.12	4.30	4.49	4.36	3.86	3.74	4.21	3.86	3.80	3.82	3.79	3.46

表 11 甘肃武都地区泥石流沉积物化学元素迁移特征值

样品名	TTP	QJG 底	QJG 顶	MCG	BLS①	BLS②
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	7.07	3.92	3.93	3.87	3.43	3.62

在第四纪沉积物中反映着某些矿物的含量关系,对气候条件及风化程度有一定的指标意义<sup>[8]</sup>。黄土的硅铝系数为 6.48~9.65,表明黄土是在干燥或半干燥地区堆积的<sup>[9]</sup>。北京周口店第一地点北京猿人洞穴堆积第 14 层、15 层(龙骨山组) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  为 3 左右,反映了该地区中更新世早期(0.8~0.7 MaBP)温暖、潮湿的气候环境<sup>[10]</sup>。但由于不同沉积类型的第四纪沉积物物质来源及沉积过程存在巨大差异,因而对气候的指示意义也不相同。各种研究资料表明,青藏高原东部地区在第四纪期间经历了从早更新世温暖湿润的气候环境向后来干旱化的转变过程,但小

江流域及白龙江流域第四纪泥石流沉积物中的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  硅铝系数却呈现出从早更新世到晚更新世越来越小的变化规律。云南小江流域中更新世山脚剖面(SJ)底部泥石流沉积物的硅铝系数高达 5.199,晚更新世早期泥得坪剖面(NDP)底部泥石流沉积物的硅铝系数为 3.86,晚更新世晚期达朵剖面(DD)顶部的硅铝系数只有 3.464(表 10)。

甘肃白龙江流域早更新世剃头坡剖(TTP)泥石流沉积物的硅铝系数高达 7.07,中更新世马槽沟(MCG)剖面泥石流沉积物的硅铝系数为 3.87,晚更新世柏林寺剖面(BLS)泥石流沉积物的铝系数只有 3.43。从区域特征来看,中更新世位于内陆地区的白龙江流域泥石流沉积物的硅铝系数为 3.8~3.9,而小江流域泥石流沉积物的硅铝系数为 5.1~4.3。晚

更新世白龙江流域泥石流沉积物的硅铝系数 3.43 左右,而小江流域泥石流沉积物的硅铝系数为 3.85~3.46。

白龙江流域与小江流域第四纪泥石流沉积物硅铝系数相同的变化规律,显示了第四纪时期两个地区气候总体波动的一致性,即气候波动的总体趋势是干燥程度逐渐增加。从以上不同时代、不同地区泥石流沉积物的硅铝系数变化规律可以看出,泥石流沉积物的硅铝系数对环境的指示特征与风化壳及洞穴堆积物相反,气候温暖湿润,硅铝系数大,反之,硅铝系数小,其原因与泥石流流体中  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的富集过程有关。

## 6 结论

青藏高原东缘第四纪泥石流沉积物中主要化学元素含量在不同地区及不同时代剖面上的变化显示出一定的规律性:泥石流流体中  $\text{SiO}_2$  含量表现为时代越老含量越高; $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量表现为时代越老含量越低; $\text{K}_2\text{O}$  含量表现为时代越老越低,时代越新越高。泥石流沉积物中  $\text{CaCO}_3$  的含量在早更新世的泥石流流体中含量高,在晚更新世含量越低;有机质含量从早更新世到晚更新世,随着气候逐渐的干冷,含量明显减少。第四纪泥石流沉积物可溶盐具有以下变化规律: $\text{HCO}_3^-$  有由老到新逐渐增加的趋势; $\text{Cl}^-$  随着温湿条件变化而变化,温湿条件好  $\text{Cl}^-$  含量减少,反之增多;间冰期湿气候条件下形成的泥石流堆积物中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量偏低,而冰期时形成的泥石流沉积物中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量偏高。

泥石流沉积物的硅铝系数对环境的指示特征与风化壳及洞穴堆积物相反,气候温暖湿润,硅铝系数大,反之,硅铝系数小,其原因与泥石流流体中  $\text{SiO}_2$  与

$\text{Al}_2\text{O}_3$  的富集过程有关。白龙江流域与小江流域第四纪泥石流沉积中硅铝系数相同的变化规律,显示了第四纪时期两个地区气候波动的总体趋势是干燥程度逐渐增加。

参考文献:

- [1] 田连全,康志成,张有富,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993.
  - [2] 吴积善,康志成,田连全,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990.
  - [3] 崔之久. 泥石流沉积与环境[M]. 北京:海洋出版社,1996.
  - [4] Tiranti D, Bonetto S, Mandrone G. Quantitative basin characterization to refine debris flow triggering criteria and processes: an example from the Italian Western Alps [J]. Landslides, 2008, 5(1): 45-57.
  - [5] Jomelli V, Brunstein D, Grancher D, et al. Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal A case study in the Massif des Ecrins (French Alps) [J]. Climatic Change, 2007, 85(1/2): 119-137.
  - [6] 李吉均,况明生. 小江流域第四纪沉积物的 ESR 年代、山原红壤发育年龄与地层划分的研究[C]//“八五”攀登计划青藏高原项目. 1995 年学术年会论文集. 兰州:兰州大学出版社,1995:64-78.
  - [7] 李永化,赵军,崔之久,等. 青藏高原东缘和邻区晚新生代泥石流活动规律及其成因[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 561-567.
  - [8] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京:科学出版社,1989.
  - [9] 刘东生. 黄土的物质成分和结构[M]. 北京:科学出版社,1996.
  - [10] 谢又予. 以沉积学方法论“北京猿人”生活时期的古气候[J]. 地理科学, 1982, 2(4): 319-325.
- (上接第 291 页)
- [32] 王国梁,刘国彬,常欣. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 339-344.
  - [33] 万素梅,贾志宽,王勇,等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及氮素消耗研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 383-390.
  - [34] 杨建军,李会科,张广军,等. 黄土高原土壤干层减缓方法初探[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 186-190.
  - [35] 段建军,王小利,张彰霞,等. 黄土高原土壤干层评定指标的改进及分级标准[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 151-154.
  - [36] 赵景波,李瑜琴. 陕西黄土高原土壤干层对植树造林的影响[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 370-373.
  - [37] 程积民,程杰,高阳. 半干旱区退耕地紫花苜蓿生长特性与土壤水分生态效应[J]. 草地学报, 2011, 19(4): 565-569, 576.
  - [38] 方新宇,李军,王学春,等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干燥化与草粮轮作水分恢复效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(16): 3348-3356.
  - [39] 王志强,刘宝元,路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944-1950.
  - [40] 孙建,李军,王美艳,等. 黄土高原半干旱偏旱区苜蓿粮轮作土壤水分恢复效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 33-39.