

瑞士卢塞恩湖水下泥流的相和搬运特征

——泥流转化为浊流的实例——

王苏民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所)

提要 本文分析了1795年在卢塞恩湖北岸韦杰斯镇附近发生了一次直接入湖的巨大碎屑流,通过该事件沉积学的研究,揭示了水下泥流不同相带的搬运特征和沉积特点,为泥流转化为浊流的研究提供了实例。

现代湖泊沉积物重力流沉积已引起愈来愈多的沉积学者的注意。通过现代各种湖泊浊流沉积及其沉积过程的研究,有助于设想一些古代再沉积作用的动力状况,从而为加深理解古代湖泊的地质过程,提供了有用的模式。

在湖泊浊流的研究中,灾变事件引起的较大规模的重力流沉积具有重大的意义。在历史上只有很少的陆上碎屑流、滑坍、地滑等具有详细的记录。对这些事件的研究,可以探讨不同类型事件产生浊流的能力、浊流形成的机理、内部相的结构和搬运过程模式。瑞士联邦苏黎世工业大学地质研究所,从1968年以来先后对灾害性滑坍入湖形成的浊流、液化作用的浊流和河流直接形成的洪水浊流进行了详细的分析和解剖^[2,7,8],特别是苏黎世湖1875年霍尔根大滑坍——浊流沉积的研究,发现了滑坍→颗粒流→浊流的转换形式,提出了浊流呈纵向(平行于湖盆长轴方向)搬运的概念^[2,9],突破了传统的浊流沉积的“扇模式”概念^[6]从而丰富和发展了浊流的理论。

卢塞恩(Lucerne)湖位于瑞士的中北部,是瑞士的著名湖泊之一,它是在第四纪冰川谷的基础上,由于冰川退缩而发育成湖泊的。该湖由几个支湖组成,在支湖的串通处都存在水下的冰碛垅岗。维瓦特湖是构成卢塞恩湖的主要盆地之一,湖盆大致呈东西向伸展,长7km,宽3km,岸坡陡峭,南坡达20~30°,北坡略缓6~10°,但湖底极其平坦,小于0.5°(图1)。韦杰斯镇座落在北岸的中部。根据历史记载,1795年在韦杰斯附近发生了特大规模的陆上碎屑流,碎屑流直接注入湖中。为了研究韦杰斯事件再沉积作用的特点和搬运过程的模式,查阅了有关的历史资料。

一、韦杰斯事件的历史记载和再沉积作用

韦杰斯事件开始是一次规模巨大的陆上碎屑流,海姆对这次事件进行了描述^[3]。1795年春,在韦杰斯镇背后的里杰山坡上出现了裂缝,同年7月15日,暴雨后发生强烈的轰鸣声,产生了缓慢流动的碎屑流,碎屑流高达6m,宽约1km,把大量陆上堆积物推入湖中,流动持续了14天。估计其体积为 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在这次事件中有400多人流离失所,28幢房屋和15个牲畜棚遭受破坏。这次块体流的物质,海姆认为主要是冰碛粘土。

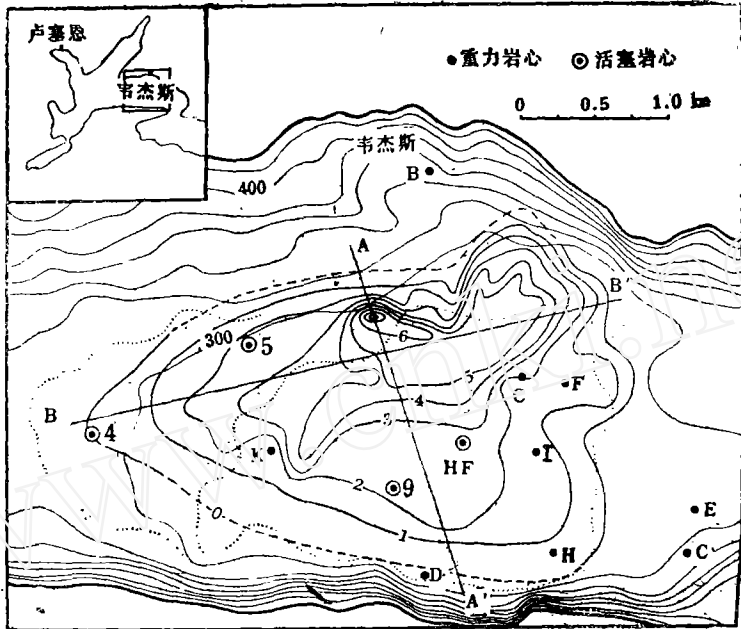


图1 韦杰斯附近湖底地形图及泥流堆积体的等厚图(包括钻孔位置)
 Fig.1 Isopach map of Lake Lucerne near the Wegiss and isothickness of assemblage by mudflow including the position of piston and gravity coring

为了探索大规模碎屑流入湖后搬运堆积的情况，采用3.5kHz高分辨地震剖面仪，进行总长46km的密集断面测量（图2），追索水下堆积体的分布范围和规模。在地震测量的基础上，用活塞采样器和重力采样器，取了4个活塞岩心和10个重力岩心（图1），其中活塞岩心都穿透了该事件的沉积物，对这些岩心均进行了系统的采样、x光照相、x光衍射、库伦仪测定和粒度分析。

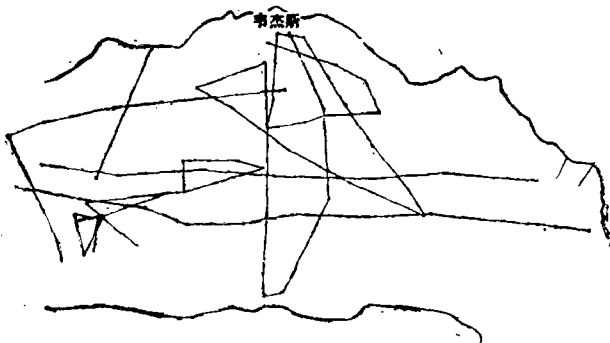


图2 高分辨剖面仪测量的剖面位置图
 Fig.2 Position of measuring section by high resolution seismic profiler

在岩心剖面中，韦杰斯事件造成的水下堆积体是较易辨认的，它成为一个均质的块状厚层泥穿插在具有纹理的典型湖相沉积之中，在色调、成分和沉积构造上都存在明显的差异。另外，由于规模较大，在其分布范围内都有相当的厚度，最厚处可达8m，仅在边缘迅速减薄尖灭。因此在地震剖面中堆积体的反射界面清晰，容易追索其范围。地震和钻孔资料揭示，韦杰斯碎屑流入湖后，形成一个巨大的扇形堆积体，其边缘有小规模的

浊流，复盖面积大约6km²，总体积约12×10⁶m³（图1）。

为了确证上述堆积体为韦杰斯事件的产物，依据卢塞恩湖存在典型的淡水碳酸盐年层沉

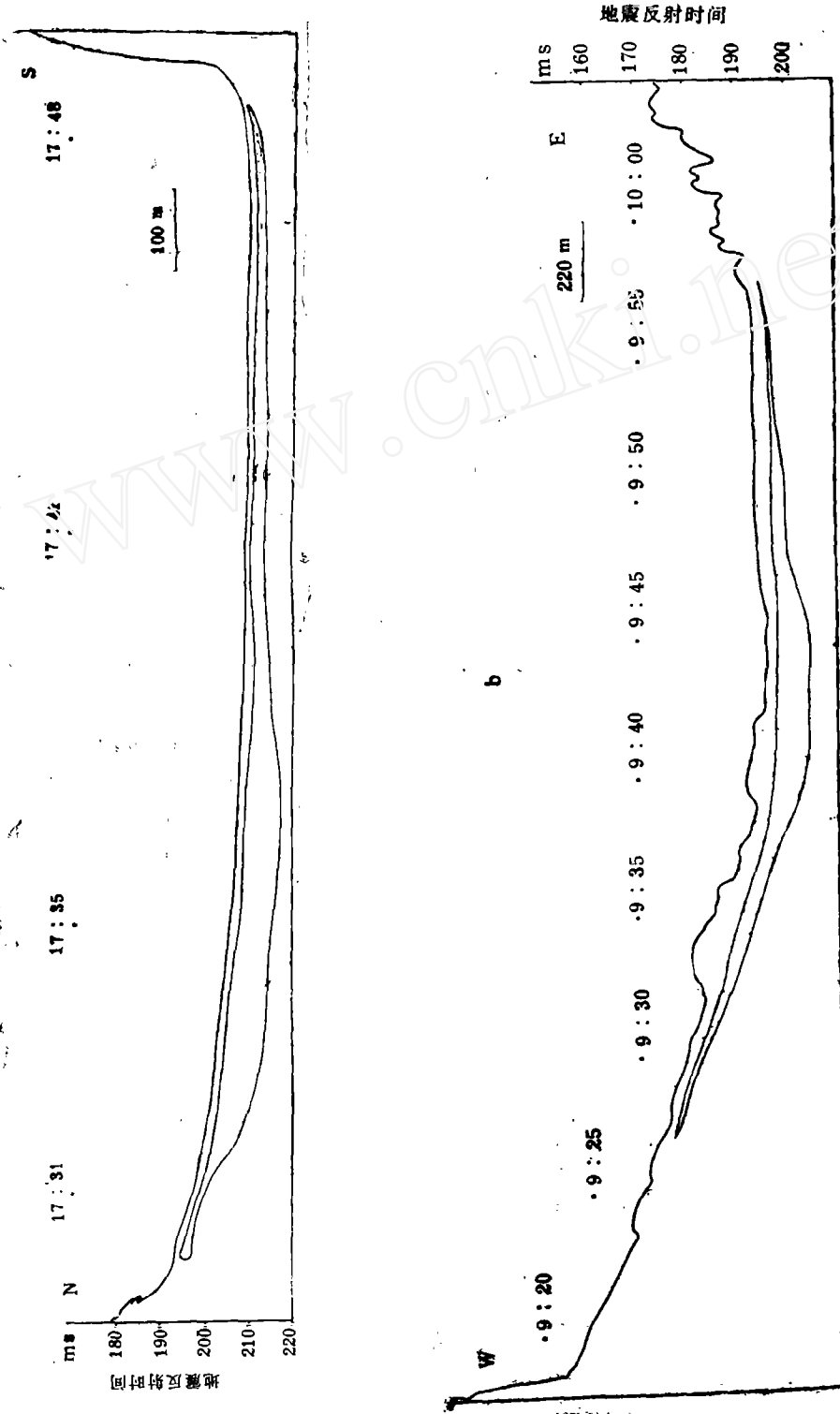


图3 地震剖面中水下堆积体的纵向剖面(a)和横剖面(b)
 Fig.3 a. Longitudinal section of the subaqueous assemblage from seismic profiles
 b. Transverse section of the subaqueous assemblage

积（关于这类非冰川年层的成因，凯尔茨^[7]已作了详细的讨论），因此可以用数 年层的方法加以验证。在重力岩心C和F中，堆积体之上地层剖面的年层数分别为182和177。由于判断上的误差，一般年层数要略低于真实年令（Ashley,1975），所以可以肯定，这一堆积体确系韦杰斯事件的产物。

二、水下碎屑流的沉积特征

根据水下地形图和地震剖面，韦杰斯附近的水下岸坡大约为10°，陡的坡度使得陆上碎屑流入湖后，在重力作用下，在斜坡区（水深0~135m）主要是侵蚀作用，没有明显的堆积，致使水下再沉积作用的沉积物体积比海姆估计的陆上碎屑流的输入体积超出一倍多；水深135m处的坡足才开始有沉积，整个堆积体分布在坡度仅0.5—1.0°的平坦湖底平原上，向南穿过湖泊的最深处（152m），直抵南岸的坡足，向西沿盆地的长轴达到4号钻孔处，最大搬运距离约3 km。所以整个沉积体系可以分陆上物源区、斜坡侵蚀区和平坦平原的沉积区（图1）。

韦杰斯事件的沉积物，基本上是一套灰棕—灰色的均质泥，表现为泥流的沉积特点。它与上覆和下伏的正常湖泊沉积——青灰色、具纹理的粉砂质淤泥形成鲜明的对照。水下泥流堆积体的平面几何形态为扇形，在纵向上为楔状。扇的主体大致呈北东~南西向排列，这既和湖底的原始地形有关，也反映了当初它的主要搬运方向。扇形体南北长2.6km，东西向最宽处为3.5km，沉积物最厚处达8.2m，在边缘迅速减薄尖灭（图1，3）。

活塞岩心HF、5、9和4都穿透了该事件的沉积，有七口重力岩心揭示了泥流沉积的顶部。根据矿物成分、碳酸盐含量和有机碳含量的分析，发现泥流沉积与其上下的湖相淤泥相比，碳酸盐、石英和长石的含量较高，粘土矿物含量偏低，作为陆源碎屑来源指标的白云石与方解石的比率偏高（图4，5，6），平均粒度偏粗。就泥流沉积本身而言，其上、中下三部分也存在一定的差别：上部沉积的粒度偏细，碳酸盐明显地比中部低，但比上覆地层高，粘土矿物的含量也略低于上覆地层，其他矿物成分变化不显著；中部或中下部与上部和

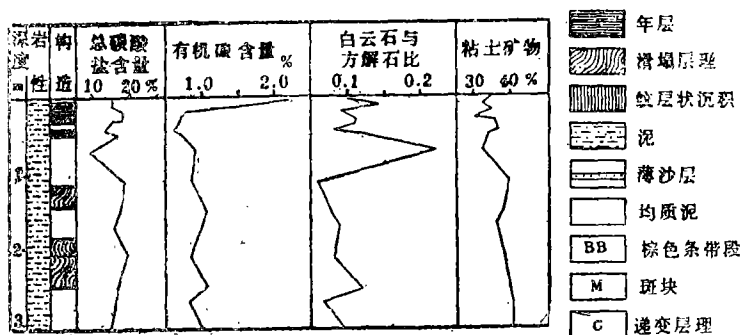


图4 岩心5沉积物组成剖面

Fig.4 Composition of sediments from Core 5

底部相比，碳酸盐、有机碳和白云石与方解石比率都较高，并含有较多的砂质组分。在这一部分的岩心中，局部可见到泥质砂或砂质泥的不规则条带，以及棕色泥的斑块或条带。靠近

扇体核部的岩心中可见到明显的搬运褶皱层理，下部则碳酸盐含量低，石英、长石和粘土矿物含量与下伏地层无明显的变化，白云石与方解石的比率也不高。这种陆源特征不明显的原因，可能与底部剪切带的侵蚀作用有关。此外，根据地层对比，发现在扇形体边缘部分，下伏地层保存得较完整，厚度较大，例如岩心9中，韦杰斯泥流堆积与下伏的另一个滑塌泥流

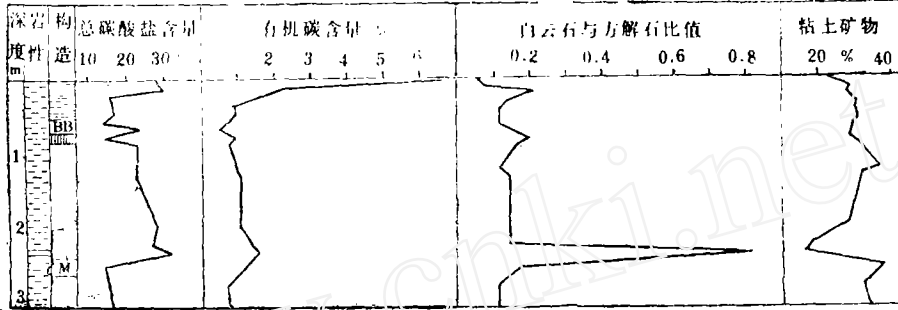


图5 岩心9沉积物组成剖面

Fig.5 Composition of sediments from Core 9

沉积之间保存了1.5m厚的正常湖泊沉积，而靠近核心部位的岩心5，相应的地层厚度只有37cm，表明后者受到了侵蚀，被截去顶部。泥流沉积中成分的差异，可能与其搬运过程的机制有关，下面将进一步讨论。

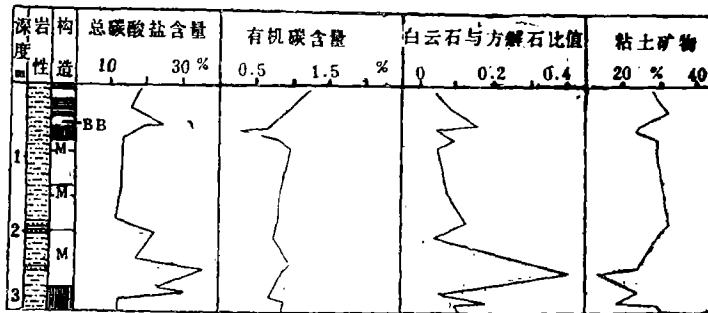


图6 岩心HF沉积物组成剖面

Fig.6 Composition of sediments from Core HF

三、水下泥流的沉积相

前已述及，整个泥流沉积是以一套均质泥为特点。目前的钻孔数量不足，特别是缺少核部的岩心，所以陆上碎屑流在水下如何转化为泥流的问题未能解决，或许陆上本来就具泥流性质也未可知。根据详细的对比，发现不同部位的沉积特点是有差别的。

陆上缓慢流动的碎屑流、泥流和地滑，进入水体后，由于密度较大，均可形成沉积物重力流或块体流。从沉积相的角度看，整个韦杰斯扇形堆积体就是一个大的泥流相，它是呈块体搬运的水下泥流的产物。至今未发现诸如泥质砾、粗砂等粗碎屑，但不能肯定扇顶部分就没有粗碎存在，尚有待进一步的工作来证明。依据沉积特征大致可把扇体分为三部分：

1. 扇体的根部和主体相 它是扇体厚度较大的部分，在扇体的纵横剖面上（图7），

包括扇顶、扇平台和扇斜坡三个部分，其分布的范围大约相当于 2 m 的等厚线(图 1)。目前只有岩心 5 邻近核部，揭示的扇体厚度 2.65m，为均质的棕灰色泥，局部含有星散的砂粒和木头碎片。其中上部的 0.61m 是均质泥，中部的 1.5m 为具明显的搬运褶皱段，下部的 0.55m 以均质泥为主，局部见有滑塌层理。沉积构造上的差异，和前面所述的沉积物成分和粒度等方面的情况是相对应的。在单井剖面 and 连井剖面图(图 4, 5, 6, 8)中可以清楚地看到，在扇体核部，上、中、下三部分的成分差异不如边缘部分明显，表现出整体搬运的性质，受到的改造较小。

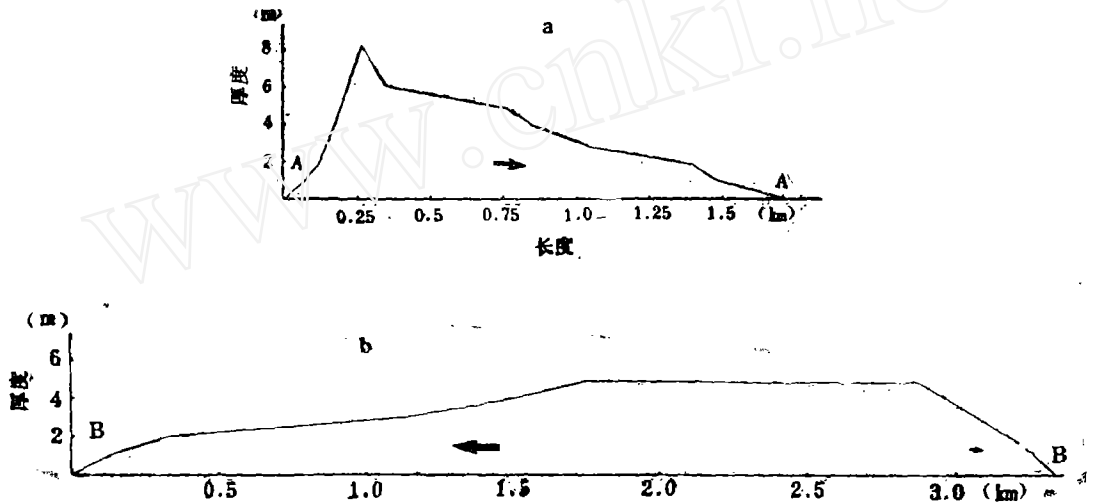


图 7 水下泥流堆积体纵(A—A')、横(B—B')剖面图(剖面位置见图 1)

Fig.7 Longitudinal(A-A')and transverse(B-B') section of subaqueous mudflow assemblage(the position of sections in Fig.1)

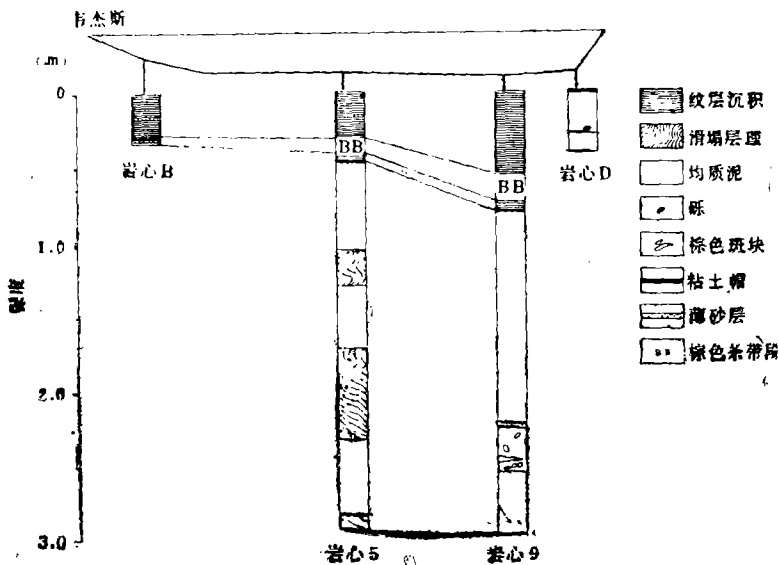


图 8 韦杰斯事件水下堆积体的连井剖面

Fig.8 Correlative profile of the assemblage from cores

2. 扇体的边缘相 该部分的沉积厚度一般小于2 m,岩心9和HF均位于边缘部分,都穿透了扇体堆积。所观察到的沉积特点显然与主体相不同。从顶部到底部都是均质泥,未见任何搬运挤压褶皱,含有棕色的斑块以及断续的或不规则的棕色条带,局部还存在数厘米厚的泥质砂层。岩心9位于盆地的最深处,泥流沉积剖面较完整,矿物成分的含量变化在剖面中是清楚的(图5)。值得注意的是:中部所表现的陆源特征最明显,同时也是棕色斑块和条带最发育段。上述的特征说明:在边缘部分泥流的流动性有所改变,块体搬运性减弱,流的紊动性增强,泥流与湖水混合的可能性增大,泥流转变为浊流的过程能够发生。

3. 末端相 实际上这一部分是指泥流转化为浊流的沉积区。浊流在这里的沉积规模较小,厚度较薄。在最西端的岩心4中,相当于韦杰斯事件的浊积层仅厚3 cm,为暗棕色的具递变层理的粉细砂层。底部为突变接触,由极细砂向上变为粉砂,最后过渡为泥。该浊积层的成分中,碳酸盐高达28%,长石和石英为44.8%,粘土矿物约25%,白云石与方解石的比率达0.12,表现出明显的陆源特点。

上述三个相带的存在,以及各相带的相对规模是有其特色的。其中根部的范围很大,而末端的浊流规模很小,介于两者之间的是均质泥。苏黎世湖1875年的霍尔根事件所形成的堆积体,显然与此不同。前者均质泥分布在滑塌碎屑扇的外缘,是滑塌——碎屑流(砾质泥)转变为泥流(均质泥)的产物;后者是滑塌碎屑扇的主体通过过渡相(可能是颗粒流产生的)粗砂层,转变为纵向搬运的较大规模的浊流(Kelts, 1980)。可见相的转变过程在两次事件中有着很大的差别,表现出两种不同的搬运过程模式。

四、韦杰斯事件的搬运过程模式

水下泥流搬运的主要动力也是重力,所以泥流的流动严格地受到湖底地形的控制。在扇形堆积体的纵横断面图上(图7),沉积厚度2 m处,存在明显的转折,堆积楔由此迅速减薄尖灭。同时在堆积体的平面图(图1)上,2 m的等厚线正处于湖底地形由最洼处向上爬坡的转折部位,表明泥流在开始逆坡流动时,厚度迅速减少,这也是迅速尖灭的原因。另外,卢塞恩湖的湖底较平坦宽展,缺乏明显的深槽,这也有利于泥流呈扇形体发育。尽管这样,在横断面上,向西顺坡的长轴方向搬运较远,比降也较平缓,仅 0.2° 左右,而向东的背流一侧,搬运不远,坡度为 0.6° ,使整个扇体向西偏移。所以湖底的地形大致上控制了水下泥流的搬运和堆积体的几何形态。

韦杰斯事件的沉积物的平均粒径一般为 $10-12\mu$,表明粘土级颗粒的含量极高,相应地流体的粘滞度也较大。哈姆帕顿^[1]用水槽试验证明,只要含有10%的粘土颗粒,流体就有足够的强度支撑砂级颗粒,形成砂质的水下碎屑流。另外堆积体的最大厚度与搬运距离的比值为0.25%,表明流体的性质类似于某些类型的陆上泥流。正如米德莱顿^[4]所指出,用平均粒径为 1μ 的粘土粒进行水槽试验时,随着浓度的增大,流体的速度和搬运距离增大,但当浓度超过250 g/L时,浊流就变成了泥流,流速和搬运距离反而减少。

泥流和其他碎屑流一样,都是层流性质,大致上相当于理想的塑性体,所以即使泥流的规模很大,由于高的粘滞度和低的流速,不易发生向湍流的转化过程。因此泥流的搬运,尤其其它的中心部分呈漂浮的泥楔,成为单一相的搬运特点,这种特点在韦杰斯泥流扇的主体部分也是显著的,表现为砂粒和木块在剖面中随机分布,未见任何拖曳构造,剖面中矿物成分

的变化也不甚明显。

水下泥流扇的边缘部分，泥流的规模变小，加上上下剪切带的影响，沉积物中可以发现一些变形构造，在矿物成分上分异也较明显，反映流动性增强的趋势。

水下泥流扇的末端部分为薄的浊流沉积，也就是说在这里才真正发生了层流性质的泥流转化为湍流性质的浊流（图9）。

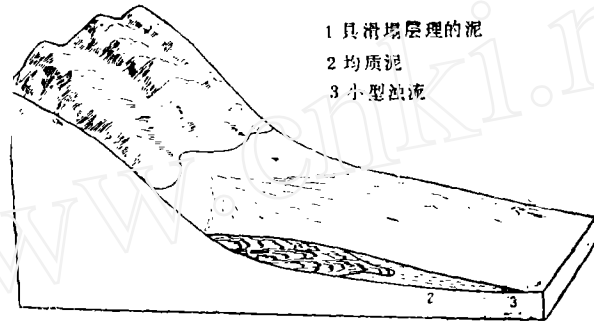


图9 韦杰斯事件再沉积作用模式草图

Fig.9 Scheme on the model of resedimentation by Wegiss Event

最后还必须指出，几乎所有的岩心中，在泥流沉积的均质泥之上，直接覆盖有厚仅数毫米的灰白色粘土盖层（Lutite cap），即使在岩心4中，同样盖在浊流的递变砂层之上。根据哈姆帕顿的理论（1972），碎屑流在水下搬运过程中，由于和周围水体的混和作用，在碎屑流的前端，发生反向剪切作用，使得部分物质被抛射到水体中，形成沉积物悬浮云，以稀浆流（Slurry currents）的形式搬运沉积，实际上这就是一种低密度浊流。碎屑流转化成浊流的能力与流体的粘滞度关系密切。泥流的粘滞度高，块体搬运性强，混合作用较弱，只有很少的细粒物质转化成浊流悬浮云。上述灰白色粘土盖层的碳酸盐含量达18.6%，长石和石英为46.7%，粘土矿物41.7%，白云石与方解石含量比率为0.12，与正常的湖泊淤泥明显不同。碎屑流与浊流沉积在时空上直接组合在一起的关系，可作为判断浊流沉积成因类型的标志之一。

五、结 论

韦杰斯事件是一次具有历史记载的，直接入湖的大规模陆上碎屑流，研究表明，水下泥流的搬运完全受湖底地形的控制，平坦的湖底是沉积的主要场所。泥流扇形堆积体内部的沉积构造较单调，甚至完全缺失沉积构造，但是，不同部位矿物成分、陆源特征的差别，反映出不同相带泥流流动的特点。泥流在水下流动过程中，产生的浊流规模较小，但从扇根一边部一末端仍表现出从层流到湍流的转化，所以相的分布格局和其他沉积物重力流是相似的。该事件的研究再次说明：在现代湖泊沉积研究中，灾变事件沉积作用的分析解剖，对加深理解不同成因浊流的形成机理、内部相的结构和搬运过程模式，具有极其重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Hampton, M. A. The Role of Subaqueous Debris Flow in Generating Turbidity Currents. *Jour. Sedi. Petro.* 42, 1972.
- [2] Kelts, K., Hsi, K. J. Resedimented Facies of 1875 Horgen Slumps in Lake Zurich and a Process Model of Longitudinal Transport of Turbidity Currents. *Ecologiae Geologicae Helvetiae*, 73, 1980.
- [3] Heim, A. *Bergsturz und Menschenleben Viertjhschr. Naturf Ges, Zurich.* 1932.
- [4] Middleton, G. V. Experimental Studies Related to Problems of Flysch Sedimentation. The Geological Association of Canada, Special Paper. (7), 1970.
- [5] Middleton G. V. Mechanics of Sediment Movement S. E. P. M. Short Course. (3), 1978.
- [6] Walker, R. G. Deep-water Sandstone Facies and Ancient Submarine Fans: Models for Exploration for Stratigraphic Traps. *The American Association of Petroleum Geologists*, 62 (6). 1981.
- [7] Kelts, K. Geological and Sedimentary Evolution of Lakes Zurich and Zug. Switzerland Doctor thesis, 1978.
- [8] Lambert, A. etc. Measurement of Density underflows from Walensee, Switzerland. *Sedimentology*. 23, 1976.
- [9] Hsu, K. J. Resedimented Facies in Ventura Basin and a Model of Longitudinal Transport of Turbidity Currents. *A. A. P. G.* 64 (7), 1980.

FACIES AND TRANSPORTING CHARACTERISTICS OF SUBAQUEOUS MUD FLOW IN LUCERNE LAKE, SWITZERLAND

—the case of mud flow transformed into turbidity current—

Wang Sumin

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Academia Sinica*)

Abstract

Understanding deeply the interrelationship between different kinds of gravity current deposits is an extremely important subject in the study of lake sedimentology. Recently the transporting process models for turbidity currents with diverse origin have been established through the analysis and anatomies of resedimentation by disaster events. A tremendous debris flow emptying directly into Lucerne Lake occurred at Wegiss Town in 1795. The research of sedimentation caused by this event reveals the characteristics of transportation and sedimentation for different facies of subaqueous mud flow, providing a good case for the transforming process from mud flow into turbidity currents.