

文章编号: 1000-0550(2002)02-0261-06

黄河下游冰成滑塌与塌陷构造的研究^①

钟建华^{1,2} 王冠民¹ 王夕宾¹ 吴孔友¹ 洪梅¹ 李勇¹ 倪晋仁³

(石油大学地球资源与环境学院 山东东营 257061)

②中国科学院长沙大地构造研究所 长沙 410013) ③北京大学环境科学中心 北京 100871)

摘要 黄河是一条有着特殊水文、水动力、沉积环境及沉积物的河流。因此,它盛产特殊的沉积现象——冰成滑塌与塌陷构造便是其中之一。

冰成滑塌与塌陷构造在黄河下游非常发育,它们主要发育在边、心滩上,有时天然堤上也有发育。它们的发育深刻地影响和改造了边、心滩的沉积景观。

冰成滑塌构造是一种在沉积物从冰冻状态转向冰成状态发育的一种特殊构造,其运动学特点是以滑,即以水平运动为主,冰成滑塌构造多呈鳞片状或皱褶状。鳞片状者直径多在数十厘米;鳞片厚度多在十厘米左右,多由数个到十余个鳞片组成。其底界是冰冻界面,皱褶状者规模甚小,每一皱褶的宽度一般宽在一厘米以内,长十到二、三十厘米,厚二、三厘米。多由数十个微型滑塌组合成一褶皱片。在天然堤内缘有一种特殊的冰成滑塌,它们使天然堤边缘呈阶步状或沟渠状,非常引人注目。

冰成塌陷构造也是一种由冰层融化所形成的特殊构造,其运动学特点是“塌”,即以垂直运动为主。冰成塌陷构造多呈多角形坑洞状。直径多在数十厘米到一、二米,大者可达十余米,深度多在十余厘米。一般成群发育。

关键词 冰成 滑塌 塌陷 黄河

第一作者简介 钟建华 男 1958年出生 教授 博士生导师 沉积学、构造地质学

中图分类号 P512.2 文献标识码 A

1 概述

冰水及冰相关沉积是近年来国际上比较关注的研究对象^[1~9],但是,冰成(沉积)构造方面的研究进展则不大。虽然Harris等利用实验模拟了冰层发育的冰土带解冻形成的一系列软沉积物变形构造(包括管状孔洞、重荷模、火焰构造等)^[10],但是,作为天然条件下的与冰冻及冰融形成的沉积构造研究则进展不大。黄河下游发育了大量的冰成(沉积)构造,其中绝大部分未见报道。本文介绍一种与冰成有关的滑塌和塌陷构造。研究地点选择在黄河下游利津浮桥至西河口的三十余公里河段上,具体位置见图1。观察时间选择在1996~2000年每年的二、三月份,因为这一时间正是黄河冰冻和冰融雪化的交互季节,有利于及时观察到与冰成有关的各种地质现象。

黄河自1974年首次断流以来在此后的二十多年里经常断流,1996年利津以下河段全年累计断流196天;1997年全年累计断流245天。黄河断流不仅仅给黄河下游的工农业生产带来了许多问题,同时也产生了一些地球科学问题,黄河断流使黄河的水文条件、河

床状态等发生了深刻的变化,一些异常的地质现象也应运而生,本文介绍的冰成滑塌与塌陷构造就或多或少与黄河断流和水量减少及三门峡水库放水形成的特殊水文及动力条件有关。

2 冰成滑塌与塌陷构造的特征

2.1 冰成滑塌构造

滑塌是一种非常常见的地质现象^[11~19],但其成因多种多样,既有流水侵蚀引起的,又有地震诱发引起的,而黄河下游的一些滑塌则与冰冻和冰融有关。这些滑塌按形态、规模及产出环境可以分为三种:一种是中等规模的鳞片状冰成滑塌;第二种是小规模的皱褶状冰成滑塌;第三种是大规模的阶步状或沟渠状冰成滑塌,以下分三部分介绍:

2.1.1 鳞片状冰成滑塌

(1)形态与规模

这种冰成滑塌从平面上看呈鳞片状(图版I-1)。一个滑塌构造由数个甚至十几个滑塌片组合而成,滑塌片多呈鳞片状,因此,从平面上看去一个规模较大的这种滑塌构造有点鳞次栉比状,非常引人注目。

^① 国家自然科学基金项目(批准号:499972037)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1999043603)、山东省自然科学基金项目(批准号:Q99E01)及高校博士点基金项目(20010425004)联合资助。

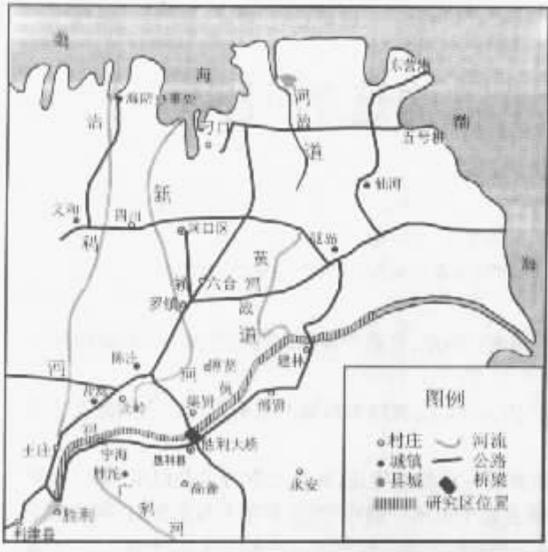


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

单一的滑塌片直径多在十余厘米到数十厘米,厚度不超过十厘米,其表面和底部非常平坦,但有时表面发育了一些次级构造(后文详述),使表面变得略显不平。

(2)伴生构造

鳞片状的冰冻滑塌构造一般发育有一些冰成伴生构造和变形构造。冰成伴生构造主要有冰晶印痕、冰融水滴蚀坑穴。有的滑塌片边缘有一圆弧形脊状突起(图版 I-2),其成因目前尚不明确。在每一个滑塌片的底部都有一滑动面。但这一滑动面非常薄;而在两相邻滑塌片之间则在挠曲状变形层理(图 2),规模也不大,变形幅度都在十厘米以内。

(3)产出环境

阶步状或鳞片状冰冻滑塌构造一般产在边、心滩外缘的斜坡上,坡度一般很缓,多在 5~10°。所以,使人难以置信的是如此缓的坡度突然能发育滑塌构造,这可能与冰冻形成的特殊界面有关。

2.2 皱褶状冰冻滑塌构造

2.2.1 形态、规模

在心、边滩内部往往容易发育皱褶状冰冻滑塌构造,这也是一种引人注目的现象。皱褶状冰冻滑塌构造由一系列小型、甚至是微型的滑塌片组成,每一个单一的滑塌片宽度多在 1 cm 左右,厚 1~2 cm;长数厘米到十几、二十余厘米。滑塌片多呈弧片形或曲线形,多由数个到数十个滑塌片彼此紧密叠合成皱褶。

2.2.2 结构与构造

前已叙述,皱褶状冰冻滑塌构造是由一系列的弧

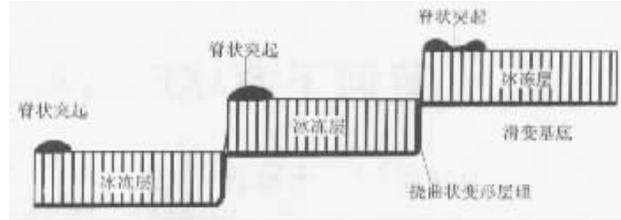


图 2 鳞片状冰成滑塌构造竖截面示意图

Fig. 2 Sketch for the vertical section of scale-like ice-induced slump structures

形或曲线形滑塌片组成的。它们是在一种从冰冻状态转变为冰融状态时形成的,与阶梯状或鳞片冰冻滑塌构造一样,皱褶状冰冻滑塌构造也是沿着一个非常斜缓的变形薄基底发育的。如果沉积物不是处于完全被水饱和和后被冻结,然后在阳光的照射下消融,使整个沉积物表层处在一个半液化状态,要在这种缓斜的状态发育滑塌构造是不可能的。

2.2.3 产出环境

一般只在边、心滩表层有缓斜坡的地方发育。

2.3 阶步状、沟渠状冰冻滑塌构造

2.3.1 形态与规模

在天然堤边缘的直立陡坡上最容易发育一种以阶步或沟渠状为特点的冰冻滑塌构造,有关其成因的运动学特点和动力学机制将在后文中详述。

阶步状或沟渠状冰成滑塌构造。以下分阶步状和沟渠状两种(图版 I-3、4)介绍。阶步状冰冻滑塌构造分为两个部分:阶步和滑塌片,阶步一般只有一级(如滑塌片被水搬运走则可有二级(图版 I-3))。宽度在数厘米到三、四十厘米,大者可达 1 m,长数十厘米到十余米,阶壁和阶面均较平坦,阶底与阶面之间常有一裂缝,裂缝呈楔形,上宽下窄,宽者可达 1~2 cm,高数十厘米。阶面高数厘米到二十余厘米,直立或陡倾斜(>70°)。滑塌片厚数厘米到二十余厘米,与阶面高度一致,宽数十厘米到一米高,长数米到十余米。因滑塌而常常挠曲成弧片状,表面常常有纵向张裂发育。

沟渠状冰冻滑塌构造实际上是阶步状冰冻滑塌构造发育不完善的变种。当阶步状冰冻滑塌构造的滑塌片未完全滑塌,还有一部分保留在阶步上时,便会在滑塌片与阶面之间形成一沟渠(图版 I-4)。沟渠的宽度在数厘米到三、四十厘米,深数厘米到二十余厘米,长数米到十余米。滑塌片的特征除了有一部分滞留在阶面上外,其余皆同于阶步状冰冻滑塌构造。

2.3.2 结构、构造

阶步状冰成滑塌构造可分为阶壁、阶面及滑塌片

三个基本组成部分,有时滑塌片会被流水搬运走而不复存在(图版 I-3)。沟渠状冰成滑塌构造可分为沟壁、沟底和滑塌片三个组成部分。

2.3.3 成因分析

阶步状、沟渠状冰冻滑塌构造是在一种比较特殊的条件下形成的。以下我们对其运动学和动力学过程作一简单介绍,它的形成过程有四个步骤:一是天然堤表层被冰冻结成冻土层(图 3a);二是冻土层以下被流水侵蚀形成一凹槽(图 3b);三是凹槽扩展到其上的冰冻是逐步失去支撑而在重力作用下开始向下弯折,形成挠曲,并牵引冰冻层向边滩方向运动,形成阶步状或沟渠状冰冻滑塌构造(图 3c、3d)。

有一点需要说明的是,这种滑塌构造的成因尽管首先与流水侵蚀有关。但形成其特征构造——阶步和沟渠却与沉积物表层处在冰冻状态有关,没有冰冻,天然堤的内缘是绝对不可能形成这种奇特构造的,尽管它可以在流水侵蚀下频繁地发育滑塌构造,但这些滑塌构造绝对不会象阶步和沟槽。所以,我们把这种奇特构造的成因归咎与冰冻有关,而不是与流水有关。

3 冰成(融)塌陷构造

这也是黄河下游一种非常引人注目的冰成构造,主要发育于边、心滩上,其成因与被泥沙覆盖的冰层

(图版 I-5)消融有关。以下分四个部分简述。

3.1 形态与规模

黄河下游的冰成塌陷构造平面上一般为多边形,既有三角形、也有四边形或五边形(图版 I-6、7),以及一些不规则形状,偶见圆形者。空间上为多边形的坑洞,直径多在数十厘米至一、二米,少数可达十几米,厚度厘米到二十余厘米。

3.2 结构、构造

一般来说,冰成塌陷构造的结构构造比较简单,可以分为两个部分:一是塌陷板片,二是塌陷板缘。一般情况下,塌陷板片多为一个板状整体,但如遇冰层不平或基底不平,塌陷板片也会发生相应的变化,变得凹凸不平,甚至被“刺穿”。如果冰层内有较小的冰层叠置,那么就会形成复式塌陷(图版 I-7),即在一个塌陷构造的内部有次级塌陷构造。塌陷板缘多数情况下有阶步状过渡带(图版 I-6、7)。

3.3 产出环境

冰成塌陷构造发育在边、心滩内部,一般成群发育,密集时会使整个边、心滩变得支离破碎,凹凸不平(图版 I-8)。

3.4 成因分析

冰成塌陷构造的形成与黄河独特的水文性质、河床条件密切相关。冬季黄河进入枯水期,尤其是近年

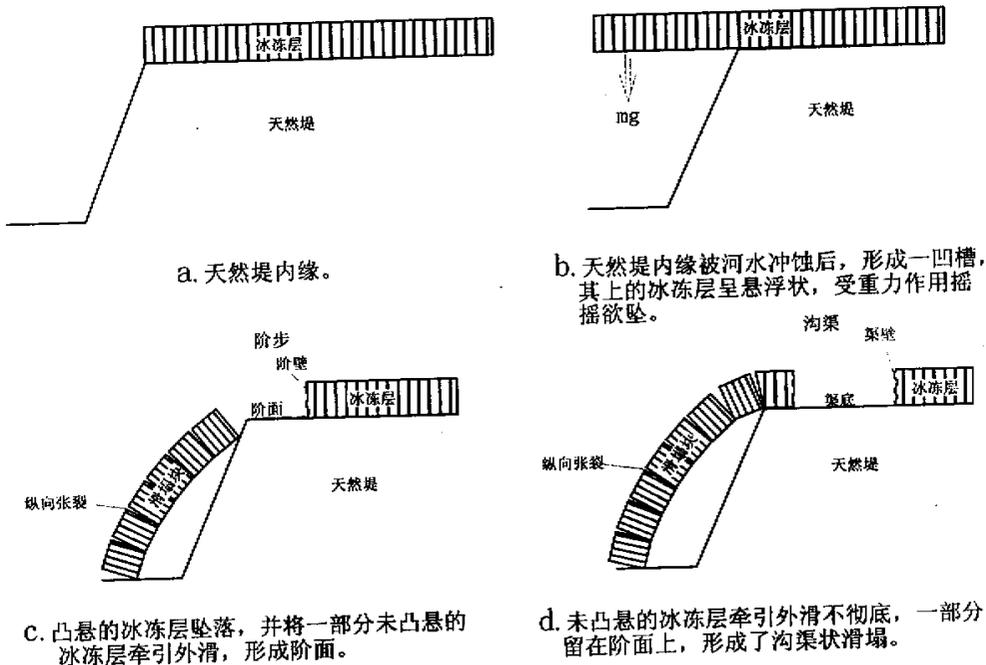


图 3 阶步状、沟渠状冰冻滑塌构造形成示意图

Fig. 3 Sketch for the formation of step-like and/or canal-like induced slump structures

来黄河断流,使得黄河下游河面经常被冰封冻。由于黄河下游河道淤塞严重,使得黄河上游的三门峡水库放水后极易在下游形成漫滩。如果漫滩的话,河床中的冰层便会随河水“爬”上边、心滩。有的又重新冻结在边、心滩上(图4a)。如果继续漫滩,泥沙便会沉积在冰层上(图4b)。气温升高冰层则融化,其上的泥沙

也就自然会塌陷,形成塌陷构造(图4c)。

在美国纽约中部的 Appalachian 高原也发育了由冰川前端裂解冰块消融形成的巨大塌陷坑穴,其长宽多在 1 km 以上(显然其已不属于沉积构造范畴,而已属于一种地貌),其形成过程和机制与黄河下游的冰成塌陷构造非常相似^[1]。

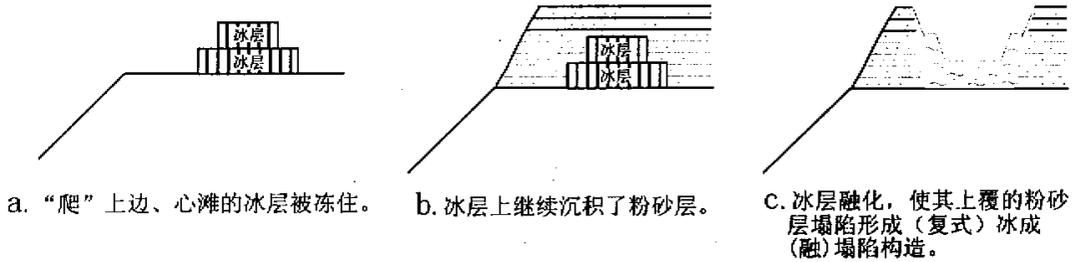


图4 冰成(复式)塌陷构造的形成示意图

Fig. 4 Sketch for the formation process of the ice-melt-induced collapsed structure

4 结束语

黄河下游是一个水、风及冰三种动力复合作用的场所,自然其沉积景观复杂异常,冰作为一种特殊的地质动力,由其形成的沉积景观上也别具一格,本文中讨论的冰成滑塌和塌陷构造就是其中之一,对它们的观察研究就虽有五年,但对其的认识很可能还不大深刻,尽管如此,我们认为本研究还是具有如下几个意义:

(1)作为一种新的沉积构造及滑塌(塌陷)构造的一种新的成因类型,冰成滑塌及塌陷构造的发现对于沉积学基础理论来说是一个必要的补充;

(2)冰成滑塌及塌陷构造的发现对于古代岩层中类似构造的成因解释及环境分析具有重要的意义。它的发育一方面指示了气温较低($0^{\circ} \pm$),另一方面又指示了一种特殊的动力学及沉积学过程。

(3)冰成滑塌及塌陷构造的发现揭示了滑塌构造具有更复杂的多种成因。

致谢 本文得到了国家科委、国家基金委山东省基金委及国家教委的资助;石油大学资源系 92、93、94、95 及 96 级部分学生参与了野外科考,借此机会一并致谢。

参 考 文 献 (References)

- 1 Fleisher P J. Dead-ice sinks and moats: Environments of stagnant ice depositor[J]. *Geology*, 1986, 14: 39-42
- 2 Eyles N. Late Pleistocene debris-flow deposits in large glacial lakes in British Columbia and Alaska[J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 53: 33~

71

- 3 Fletcher C J N and Desloges J R. Sediments of ice-dammed. Self-draining Ape Lake. British Columbia[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1987, 24: 1735-1747
- 4 Liverman D G E. Sedimentation in ice-dammed Hazard Lake, Yukon [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1987, 24: 1797-1806
- 5 Eyles N and McCabe A M. The Late Devensian (<22,000 BP) Irish Sea Basin: the Sedimentary record of a collapsed sheet margin[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1989, 8: 307-351
- 6 Aleksis D and Martin R. Late Wisconsinan sub-glacial clastic intrusive sheets along Lake Erie bluffs, at Bradville, Ontario, Canada[J]. *Sedimentary Geology*, 1997 (2): 225-248
- 7 Fletcher C J N and Siddle H J. Development of glacial (Llyn Teifi, west Wales): evidence for lake-level fluctuations at the margins of the Irish Sea ice sheet[J]. *Journal of the Geological Society: London*, 1991, 155: 389-399
- 8 McCabe A M, Knight J and Mccarron G. Ice-flow stages and glacial bedforms in north central Inland: a record of rapid environmental change during the last glacial termination[J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156: 63-72
- 9 Dowdeswell J A, Whittington R J, Jernings A E, Andrews J T, Mackensen A and Marienfeld P. An origin for laminated glaci-marine sediments through sea-ice build-up and suppressed iceberg rafting[J]. *Sedimentology*, 2000, 47: 557-576
- 10 Harris C, Murton J and Davies M C R. Soft-sediment deformation during thawing of ice-rich frozen soils: results of scaled. Centrifuge modeling experiments[J]. *Sedimentology*, 2000, 47: 687-700
- 11 Stone B D. Analysis of slump slip lines and deformation fabric in slumped Pleistocene Lake Bed[J]. *Jour. Sed. Petrology*, 1976, 46: 313-325
- 12 Farre J F, McGregor B A, Ryan W B F and Robb J M. Breaching the shelfbreak; passage from youthful to mature phase in submarine

- canyon evolution [M]. In : Stantey D J and Moore G J , eds. The shelf break. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ. , 1983 , 33 : 25 ~ 39
- 13 Plint A G. Slump blocks , intraformation conglomerates and associated erosional structures in Pennsylvanian fluvial strata of eastern Canada [J]. *Sedimentology* , 1986 , 33 : 387 ~ 399
- 14 Van de Poll H W , Patel I M. Slump blocks , intraformational conglomerates and associated erosional structures in Pennsylvanian fluvial strata of eastern Canada [J]. *Sedimentology* , 1989 , 36 : 137 ~ 145
- 15 Plint A G. slump blocks , intraformational Conglomerates and associated erosional structures in Pennsylvanian fluvial strata of eastern Canada [J]. *Sedimentology* , 1989 , 36 : 145 ~ 150
- 16 Tama ' s H. Lantos M. Au evaluation of Slump fold formation using palaeomagnetic techniques [J]. *Sedimentary Geology* , 1994 , 90 : 233 ~ 240
- 17 Thomas B R , Anne R F. A submarine slide scar and channel filled with slide blocks and megarippled Globigerina sands of possible contourite origin from the Pliocene of Sumba , Indonesia [J]. *Sedimentary Geology* , 1996 , 103 : 145 ~ 160
- 18 M. R. Gibling M R , Tandon S K. Erosional marks on consolidated banks and slump blocks in the Rupen River , north-west India [J]. *Sedimentology* , 1997 , 44 : 339 ~ 348
- 19 钟建华 李理. 黄河断流后三角洲 (水上平原) 的滑塌构造研究 [J]. *沉积学报* , 2000 , 18 (1) : 7 ~ 12 [Zhong Jianhua , Li Li. Study of the slump structure on the Yellow River delta during its in zero [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000 , 18 (1) : 7 ~ 12]

Study on the Ice-Induced Slump and Subsidence Structures in the Lower Course of Yellow River

ZHONG Jian-hua^{1,2} WANG Guan-min¹ WANG Xi-bin¹
WU Kong-you¹ HONG Mei¹ LI Yong¹ NI Jin-ren³

1 (Institute of Resources and Informations , China University of Petroleum , Dongying Shandong 257061)

2 (Changsha Institute of Geotectonics , CAS , Changsha 410013)

3 (Center for Environmental Sciences , Peking University , Beijing 100871)

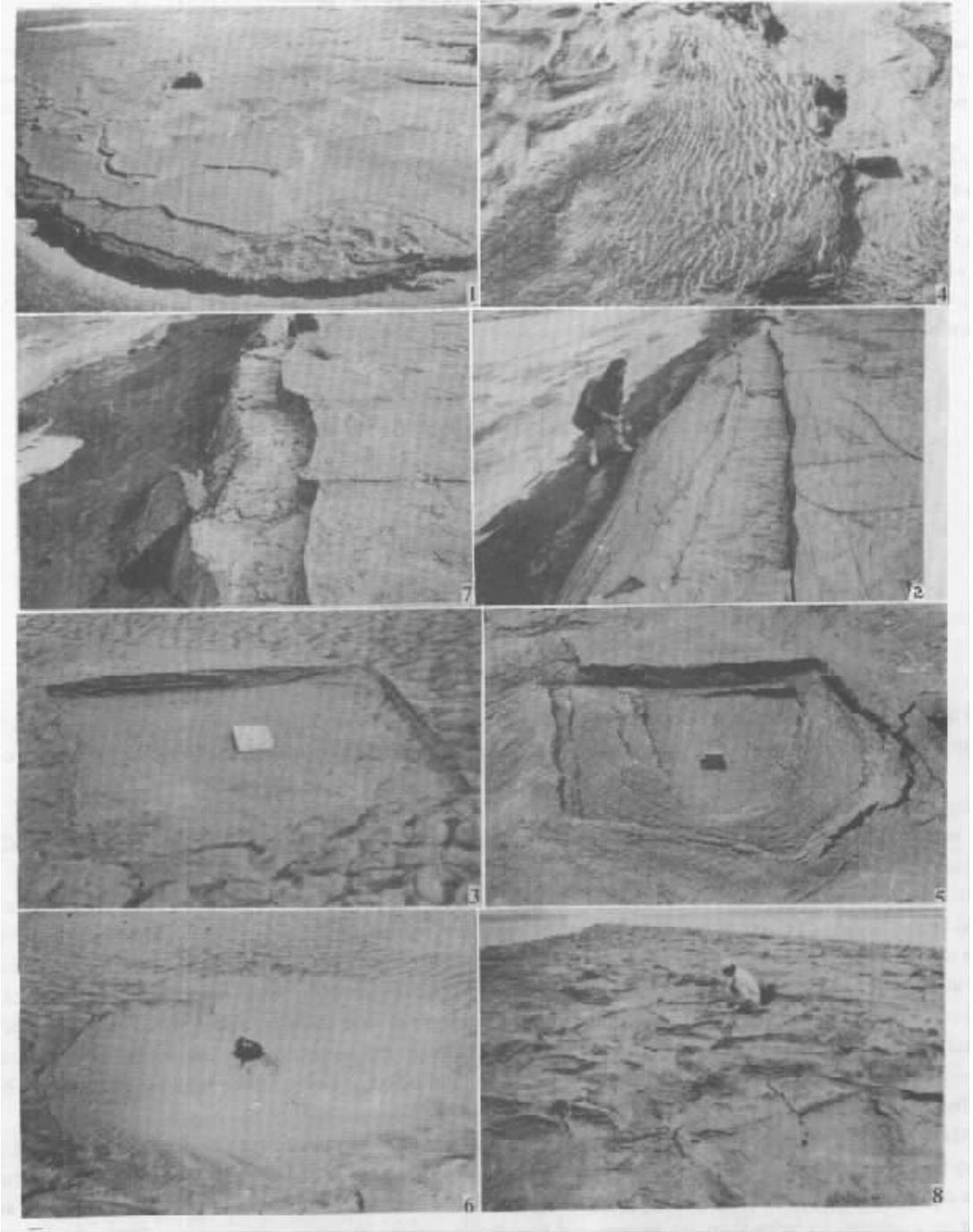
Abstract The Yellow River is of special hydrology , hydodynamics , sedimentary environment and deposits , resulting in forming a lot of unusual sedimentary phenomena : one of them is ice-induced slump or subsidence structure.

Ice-induced slump and subsidence structure are considerably common in the lower course of the Yellow River. They mainly develop in the point bar and/or channel bar , sometimes also in levee. Their development influences and remakes the sedimentary views of the point bar and channel bar.

Ice-induced slump structure is an unusual structure that is formed in such a state that the sediment is transformed from the being frozen to being melt , and its motion is featured by sliding , mainly with horizontal motion. Those ice-induced structures developing in the point bar and/or channel bar are like scales or wrinkles. Those ones like scales composed by several to more than ten , are dozens of centimeters in diameters with the thickness of mostly ten of centimeters , and their bottom boundaries are frozen ones ; and those ones like wrinkles are very small in size and each wrinkle is below one centimeter in width , ten to thirty centimeters in length and two or three centimeters in thickness. Sometimes , a special ice-induced slump may be seen in levee and it makes the edge of levee look like steps or gullies.

Also , the ice-induced subsidence structure is a kind of special structures formed by ice layer ' s melting and its motion feature is subsiding , mainly moving vertically. Ice-melt-induced subsidence structures have the multangular shapes and look hole-like. Their diameters are mostly several tens of centimeters to one or two meters and the largest may amount to more than ten meters and the depth is more than ten centimeters. They often develop in groups.

Key words ice-induced , slump , subsidence , Yellow River



图版 I 说明 1. 冰成滑塌。鳞片状。摄于滨州浮桥下游 200 m 处边滩 2. 鳞片状冰成滑塌外缘的圆弧形“谷”状突起, 其外缘有大量冰晶印痕。摄于滨州浮桥下游 200 m 处边滩 3. 冰冻滑塌阶步。大部分滑塌片已被流水搬运走。摄于胜利 I 号边滩 4. 冰冻滑塌沟渠。滑塌完整地堆积在边缘, 其上发育了大量的纵向张裂。摄于胜利 I 号边滩 5. 冰沙互层。粉砂之上覆盖了一层冰层; 冰层之上又覆盖了一层粉砂。冰层溶化后会使其上的粉砂层塌陷, 形成冰成塌陷构造。摄于胜利 I 号边滩 6. 三角形冰融塌陷。系三角形浮冰片消融所形成。摄于胜利 I 号边滩 7. 多边形复式冰融塌陷。系两层大小不同的冰层叠置消融所形成。摄于胜利 I 号边滩 8. 平整的滩脊因冰融塌陷的发育而变得差参不平。摄于东张边滩。