

文章编号:1000-0550(2001)03-0357-06

黄河三角洲上的冰成隆丘的研究^①

钟建华^{1,3} 倪晋仁² 宋维奇¹ 王冠民¹

马在平¹ 李勇¹ 刘华¹

1(石油大学资源系地球化学—岩石圈动力学实验室 山东东营 257061)

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

摘要 黄河三角洲上发育了大量的冰成构造,非常引人注目,冰成隆丘便是其中的一种。冰成隆丘外观上呈丘状,以圆丘状者多见,少数呈长丘状、不规则台状、塔柱状、土堆状及火山状;规模不等,小者高数厘米;大者数十厘米,最大长度可达1m以上;表面平滑或具有裂缝或有火山口状坑穴,或有大量豆状瘤状或根状构造。有的内部具有穹隆状层理,有的具有复杂的变形层理。冰成隆丘一般产在边、心滩上或河床上,其成因有三种:一是冰融水滴积;二是冰融塌陷拱隆;三是冰洞滴积。

黄河特殊的水文、水动力及气候条件使得冰层中有时含有(大量)泥沙或冰层之上被泥沙覆盖,当这些冰层融化时,其中或其上的泥沙便会随冰融水一道滴向地表,在地表的相应部位形成冰成隆丘;当冰层中有空洞时,且其上又沉积了一层泥沙,那么当冰层溶化后,在空洞的部位便会因拱隆而形成隆丘;如果边、心滩上的侵蚀坑穴中的冰层中心或其它部位有融化形成的空洞或裂缝,那么冰层之中或之上的泥沙便会随冰融水一道沿空洞或裂缝滴落到坑穴中,形成冰洞滴积隆丘。

冰成隆丘是一种暴露和低温($\pm 0^{\circ}\text{C}$)条件下的产物。其成因与黄河复杂的冰—水—泥沙作用有关。

关键词 冰 隆丘 成因

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

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 概述

到目前为止,人们仅发现寥寥数种冰成沉积构造(冰晶印痕、冰压刻痕及冰工具痕)^[1]。事实上,象水成沉积构造一样,冰成沉积构造也非常丰富。黄河三角洲上就发育了许多冰成构造,种类繁多,形貌各异,令人惊奇,其中绝大部分是从未被人发现或报道过的。

通过五年的观察发现,黄河三角洲上的冰成沉积构造有近二十余种(冰晶印痕、冰压刻痕,冰工具痕,冰冻裂痕、冰冻滑塌、冰冻滑塌沟槽、冰水流痕、冰融陷痕、冰积“豆粒”、冰积隆脊、冰积根状构造、冰融水蚀沟槽、冰位线痕、冰积假虫迹、冰积三角洲、冰冻气泡痕、冰劈柱状裂理及冰成隆丘等)。这些丰富奇妙的冰成沉积构造深深地吸引了我们,也是我们乐此不疲的根本所在。以下简要介绍其中之一——冰成隆丘。

2 冰成隆丘的特征

黄河三角洲进入冬季后,气温常常在 0°C 以下,最低可达零下十几度,所以河水常常结冰。冬末春初(三月份),冰雪开始消融,形成凌汛。如遇上游放水,大量

的冰块便会涌上边、心滩,同时沉积一些泥沙,形成黄河特有的水—冰动力学和水—冰沉积学现象,使得一些特殊的地质现象应运而生,冰成隆丘便是其中之一。

本次研究的区域选择在黄河三角洲东张至西河口二十余千米的河段上,见图1。

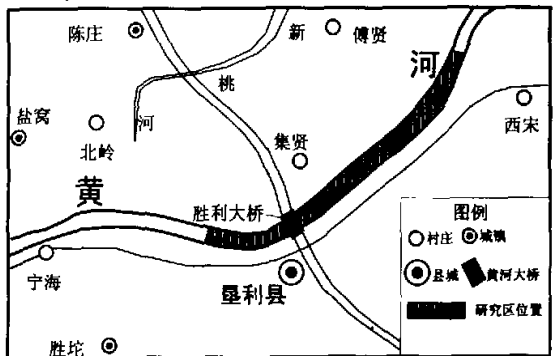


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

2.1 形态及规模

黄河三角洲上的冰成隆丘整体上呈丘状,但形貌

① 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043603)、国家自然科学基金项目(49972037)及山东省自然科学基金项目(Q99E01)联合资助。

非常复杂,非一般文字所能描述,简要概括如下几类:①圆丘状;②长丘状;③不规则台状;④塔柱状;⑤土堆状;⑥火山状。

圆丘状者总体上呈圆丘型,表面比较规则,规模不一(图版 I-1~9),小者直径多在 20 cm 以下,高度一般小于十厘米(图版 I-5~9);大者直径可达五、六十厘米,高度可超过 20 cm(图版 I-1~4)。长丘状者长宽比多大于 2,宽度多在十到三十余厘米,长数十到 1 米多,高数厘米到十余厘米(图版 I-10)。不规则台状者在平面上长宽相近,长宽多在数十厘米,高数厘米到十余厘米。表面平整或起伏不平(图版 I-11)。塔柱状者底部直径较大,向上逐渐变细,但高度常大于直径(图版 I-12)。直径和高度多在二十厘米以下。土堆状者外形极不规整,状如土堆(图版 I-13)。规模不一,小者高宽不及十厘米,大者宽数十厘米,高十到三十厘米。火山状者外观上与圆丘状者相似,不同之处在于其中心有个假火山口(图版 II-14、15)。规模不一,但以小规模者多见,小者直径多在一、二十厘米以下(图版 I-14),少数大者直径可达一、二米(图版 I-15);高度一般不超过二十厘米。

2.2 结构、构造

冰成隆丘的结构、构造可以很简单,也可以很复杂,与其成因、形态和规模有密切关系。圆丘状者其结构、构造较简单。如果系冰融水滴积形成的圆丘状隆丘其内部一般有与表面形态一致的上凸形纹理(图版 I-16);如果是靠冰融塌陷拱隆形成的圆丘状隆丘,其周缘则有变形层理或滑塌构造,中部或周缘则有因拱顶形成的“V”字形裂缝(图版 I-8~11)。长条状者的情形也与圆丘状者相同。不规则台状者一般是通过周缘冰融塌陷拱隆形成的。由于基底不平,其内部的层理多半发生了变形,周缘多被截切或发育了滑塌变形构造(图版 I-11)。塔柱状者一般都是由冰融水滴积形成的,其表面和内部常有豆粒状或瘤状构造或瘤状构造(图版 I-12)。这些构造都是含大量泥沙的冰融化时,泥砂随冰融水自上而下滴积形成的。火山状隆丘其中央的“火山口”是冰融水晚期含泥沙很少滴蚀而形成(图版 I-14)的或冰融塌陷印痕(图版 I-15)。

2.3 伴生、共生构造

冰成隆丘的常见伴生、共生构造主要为前述一系列的冰成或冰水成因的构造,以冰晶印痕、冰水流痕、冰积“豆”粒构造、冰积根状(瘤状)构造、冰冻裂痕最为常见和直接。波痕、水位线痕及流痕有时也能见到。风蚀沟槽偶尔也有发育,以下简要介绍。

(1) 冰晶印痕。由于冰成隆丘上常发育于冬末

春初,白天冰成水,晚间水成冰,其结果是在冰成隆丘上或其周缘留下大量冰晶印痕。

(2) 冰水流痕。确切地应称为“冰融水流痕”。冰水流痕也是一种非常常见的伴生构造。尤其是对冰融水滴积或漏积成因的隆丘来说则更是常见(图版 I-10、12、15)。冰水流痕一般沿冰成隆丘周缘呈放射状排列。冰水流痕的规模一般不大,长度一般在数十厘米以来,深度不超过 3~5 mm。以线形扇状为主。

(3) 冰积豆粒构造。这也是一种比较常见的伴生构造,对某些冰融水滴积形成的特殊隆丘来说,“豆粒”是其基本的组成物质(图版 I-12)。据观察,豆粒构造是在一种冰融水严重不足,而其中的沉积物又过度饱和的条件下形成的。豆粒构造与生物粪球粒有些类似,应当特别注意。

(4) 冰积根状(瘤状)构造。这也是一种比较常见的伴生构造。许多冰融水滴积形成的隆丘就是通过许多“细根”或“细瘤”的不断加积形成的。根状或瘤状构造的形成同样是在一种冰融水严重不足,而其中的沉积物又过度饱和的条件下形成的。

(5) 冰冻裂痕。由于冰成隆丘形成于冬末春初,冰融冰冻频繁发生,所以冰冻裂痕与冰成隆丘也常常伴生或共生。冰冻裂痕与泥裂完全不同,平面上呈梭状蠕虫状或三分支状(如三联裂谷)的裂缝,其缝壁表面常微微翘起。

(6) 冰融皱痕。如果冰成隆丘形成后其上又发育了一层冰,且其中有少量泥沙,那么该层冰融化后便会在隆丘上留下一些非常特殊的皱痕(图版 I-4~6)。我们把它称为“冰融皱痕”。

(7) 波痕。如果冰成隆丘发育于极浅(数厘米)水中,且水体有波动,那么隆丘周缘就会发育一系列小型波痕(图版 I-3、6);如果水较深,且波动较大,那么很难形成冰积隆丘。

(8) 水位线痕。水位线痕的成因与波痕相似,当然,多级的水位线痕是水逐渐变浅的标志(图版 I-2、5)。

(9) 流痕。虽不常见,但也是一种伴生和共生构造,很明显,如果有波浪或退水作用,流痕就自然存在。图版 I-5 中的隆丘的下半缘就发育了极为细小的流痕。

2.4 产出环境及时间

冰成隆丘可以发育于三角洲的心滩、边滩,甚至河床上。冰融水滴积隆丘分布较广,既可以发育在边滩上,也可以发育滩缘,甚至在河床上;而冰(雪)融塌陷隆丘仅发育在滩台或滩脊上;冰洞(缝)漏积隆丘一般也仅发育在滩脊或滩台上(图 2)。每年冬末春初(3月

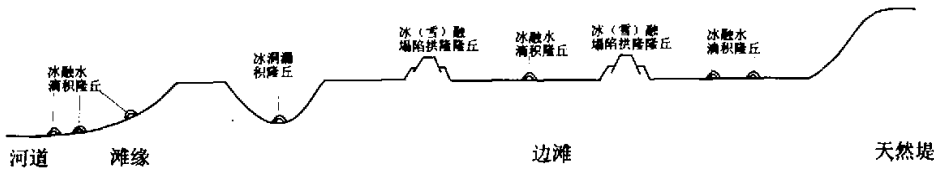


图2 不同类型冰成隆丘发育位置简图

Fig. 2 Sketch for the location of different type ice induced heavings

份)冰雪消融时是冰成隆丘发育的唯一时段。

3 冰成隆丘的成因

冰成隆丘是一种冰直接或间接作用形成的产物,当然,冰融化成水的过程和结果才是这种构造形成的关键。

无论冰成隆丘规模或形态上有多大差异,其形成机制无非有三种:一是冰融水滴积;二是冰融塌陷拱隆;三是冰洞漏积,以下简要叙之。

3.1 冰融水滴积成“丘”

如果冰层之中或之上有大量泥砂,那么在冰融化时,其中的泥砂段会随冰融水的滴落而被搬运到地表,

如果地表无水或水很浅,且冰层较大较厚的泥沙较多,则在地表的相应部位会形成一个隆丘,我们用图1表示之。隆丘的形态、规模及其结构构造与冰层及其沙泥含量有密切关系。

形态较圆,表面比较光滑的隆丘是冰融水滴落位置比较固定,水量与泥沙比例适中的结果(图3a);形态呈长条状者有两种情况;一种是冰融水滴落位置不断后退,使得隆丘朝纵向发展(图3b);第二种是冰融水呈水帘状滴落而使隆丘在横向上同时发育(图3c)。具有豆粒或根状、瘤状结构者为冰融水不足,而泥沙过渡饱和和滴积作用的结果。尤其是豆粒结构的塔柱状这种隆丘的形成过程则更是如此。火山状隆丘的发育则

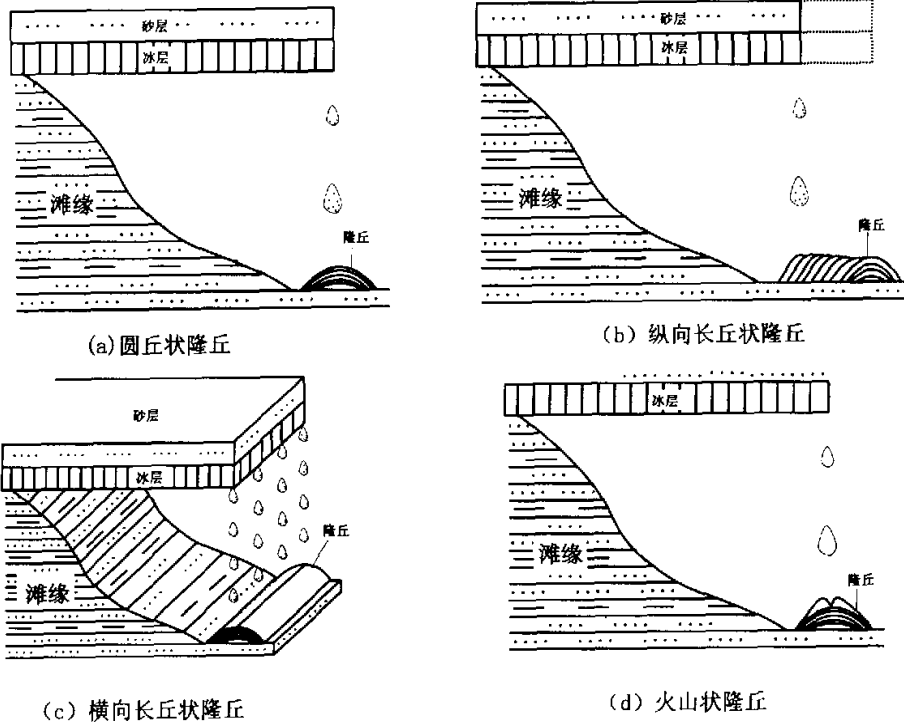


图3 冰融水滴积成丘的四种示意图

Fig. 3 Sketch for the formation processes of the heavings by ice-melt water dropping

要求冰融水在早期含泥沙较多,而晚期含泥沙很少(图3d)。

黄河复杂的水力学行为及高泥沙含量非常有利于冰融水滴积隆丘的形成。水量的大幅度变化促进了冰层与沉积物交互发育。98年冬季我们最多观察到了6层冰层夹5层泥沙,总厚度超过70 cm。近年来,黄河三角洲地区的干旱也促使了风蚀作用发育,使一些泥沙被风吹扬到冰层中,为冰成隆丘的形成提供了物质

基础。

3.2 冰(雪)融塌陷拱隆成丘

这也是冰成隆丘的一种重要形成方式。前面提到了冰层与沙泥层交互成层问题。如果冰层或冰冻层上有融化孔洞(图版 I -17、18)时,又再如果其上沉积了一层沙泥(图 4a)。待冰层或冰冻层完全融化后便会形成塌陷,孔洞处因充填了泥沙而会相对拱隆,形成冰成隆丘,如图 4b 所示。但必须注意,拱隆是相对塌陷

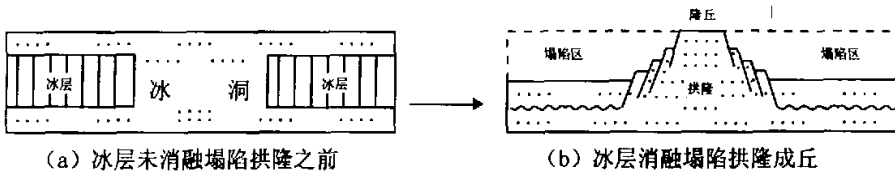


图 4 冰(雪)融塌陷拱隆成丘示意图

Fig.4 Sketch for the heaving-formation by collapsing due to ice-melting

而言的,实际上,在隆丘形成过程中并未真正受到一种自下向上的拱力,隆丘的绝对高度也未发生任何变化。

很明显,冰成隆丘的形态、规模与冰层或冰冻层厚度及其中的孔洞密切相关。冰层或冰冻层越厚隆丘便越高,反之相反。孔洞越大隆丘直径也越大,反之也相反。如果冰层厚而孔洞相对较小,这种条件下形成的隆丘完整性较差,滑塌破裂严重,容易形成土堆状隆丘;如果冰层薄,而孔洞大,形成的隆丘完整性则相对较好,滑塌破裂也不严重,容易形成台状隆丘。

有两点需要着重说明一下:一即孔洞的形成机制。孔洞的形成机制有两种:一是冰(雪)层的不均衡消融或冰冻层的冰融水滴蚀坑穴(图版 I -17、18);二是河床中的浮冰块在(洪)水的作用下冲上心滩或边滩,在冰块之间形成孔洞。

3.3 冰洞(缝)漏积成丘

冰洞(缝)漏积成丘的机制与冰融水滴积成丘机制有些相似,但本质不同。冰洞漏积成丘的机制是冰层在某个或某些部位融化形成了孔洞,但在融化过程中并未在其下的相应部位形成隆丘,而是后来(洪)水将泥沙冲携到冰层上后,这些融化孔洞起了一个漏斗的作用,使泥沙顺着孔洞漏积到其下相应部位形成隆丘,一些滩洼中隆丘的成因机制就与此有关(图 5)。由这种方式形成的隆丘规模有时比较大(图版 I -1、2)。

4 结语

以上简要地介绍了黄河三角洲上的冰成隆丘,可以看出它们不仅在形貌上,而且在成因上都是非常复杂的。

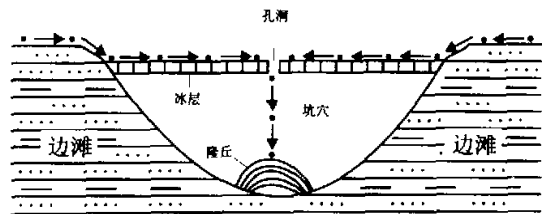


图 5 冰洞漏滴成丘示意图

Fig.5 Sketch for the formation of the heaving by the leaking-dropping

沉积物表面的非生物成因隆丘是一种极为引人注目的沉积构造,它的形成与一种特殊的动力学过程和沉积环境有关,因而它的地质意义也就非同一般。首先从动力学的角度来说,隆丘要高出沉积物表面,那么它就需要一种动力使其产生(相对)势能。对黄河三角洲上的冰成隆丘来说,冰层提供了直接或间接的动力,正因为这种动力与一般的水动力不同,因而也使得冰成隆丘与其它水成构造之间有很大的不和谐性,有时候它们甚至强烈地改造了水成构造,表现出了极大的特殊性而引人注目。

光有动力还不够,还必须有物质基础和形成、保存环境,黄河特殊的水文条件为形成冰成隆丘准备了物质基础。这种特殊的水文条件就是水量的急剧变化及高泥沙含量,正是这种水文特殊性使黄河三角洲在冬季广泛地发育了冰沙互层沉积,从而为冰成隆丘的形成准备了动力及物质基础。此外,黄河特殊的水文条件同时也为冰成隆丘的形成创造了另一个有利的条

件,黄河冬春季低水量使三角洲广大的心滩和边滩,甚至部分河床广泛暴露,为冰成隆丘的形成创造了有利的“着生”条件。黄河河水含大量的泥沙又使得冰成隆丘得以迅速被埋藏而保存下来。当然,有相当一部分冰成隆丘被风改造砂掩埋而被保存下来。

黄河三角洲上的冰成隆丘的发现具有以下三个意义:

(1) 冰成隆丘是一种新发现的沉积构造。作为一种自然现象或自然产物,冰成隆丘的发现可以在某一方面丰富和完善沉积学基础理论。

(2) 由于冰成隆丘成因的复杂性,因而它拥有的地质信息也非其它一般沉积构造所有;首先从动力学上,它反映的是与冰融水滴积、冰融塌陷拱隆及冰洞漏积有关;其次,它反映的是一种暴露与准暴露环境;再者,它反映了一种低温气候($0^{\circ}\text{C} \pm$);最后它反映了一

种冰(雪)与沉积物之间的复杂相互作用问题(冰砂互层)。

(3) 可以为古代岩层中类似构造的成因及其环境气候研究提供依据。

致谢 首先要感谢国家科委、国家基金委、山东省基金委及石油大学的资助。石油大学(华东)科研处刘文田处长始终对本项研究给予了高度的关注和支持;石油大学资源系的92、93、94、95及96级的部分同学协助完成了野外科考。陈国达院士也多次来信鼓励,借此机会一并致以深深谢意。

参 考 文 献

- 1 Reineck H.E., Singh I.B. *Depositional Sedimentary Environments-With Reference to Terrigenous Clastics*[M]. Berlin: Springer-Verlag. 陈昌明,李继亮译.北京:石油工业出版社,1979

Study on the Ice-induced Heaving in Yellow River Delta

ZHONG Jian-hua^{1,3} NI Jin-ren² SONG Wei-qi¹ WANG Guan-min¹
MA Zai-ping¹ LI Yong¹ LIU Hua¹

1(Resource Science Department, Resource and Environment Institute, Petroleum University of China, Dongying, Shandong 257061)

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

3(Changsha Institute of Geotectonics, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410013)

Abstract

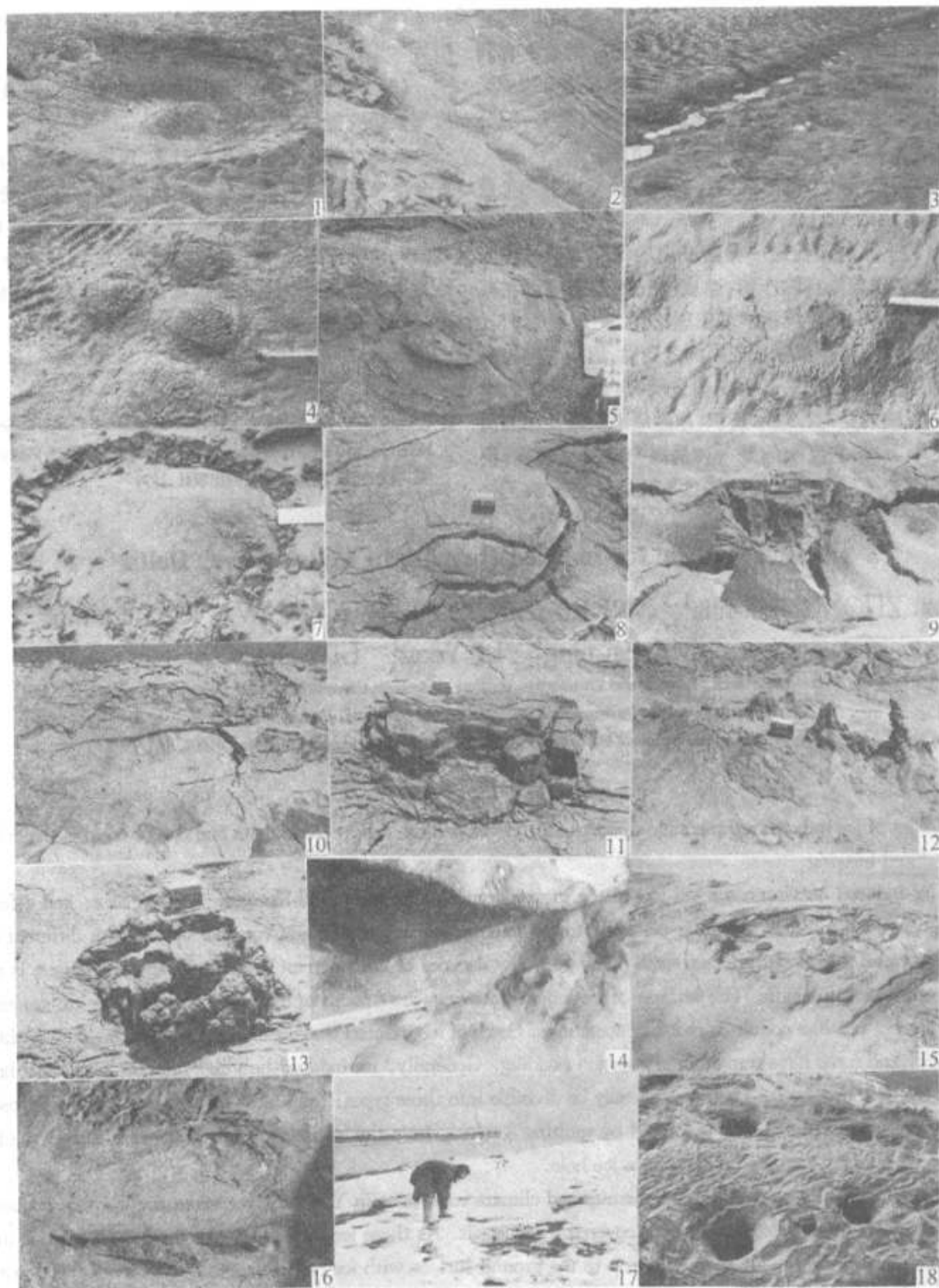
A lot of ice induced sedimentary structures are developed on Yellow River delta and one of them is remarkably ice induced heaving.

Ice-induced heaving has a hill-like shape in appearance and circular hill-like ones is often seen, and a few of them have long hill-like, irregular platform, tower-column, earth pyramid and volcanic shapes with different sizes ranging from several centimeters (small ones) to a few decades of centimeters (large ones) and the largest is more than one meter in length. The surfaces of ice-induced heavings are smooth or have fission or pits like crater, and or have a lot of pea-like nodule or root-like structures. Some of ice-induced heavings have dome-like bedding within its interior, and some have complex deformation bedding. Generally, ice-induced heavings develop in channel bar or point bar or course beds. Their genesis may be divisible into three types: the first is formed by dropping deposition of ice-melt water; the second is formed by vaulting resulting from the breakdown caused by ice melting; the third is formed by dropping deposition from a ice hole.

The unusual hydrology, hydrodynamics and climate conditions in Yellow River make the ice beds containing (a great deal) mud-silt or the ice beds covered by mud-silt. As those ice beds melt, the mud-silt contained in the ice beds or covering the ice beds will drop to the ground surface with ice melt water and form ice-induced heaving in the relevant position. If a hole develops in the ice bed and in the meantime, it is also covered by a layer of mud-silt, and when the ice bed melt, a heaving will be formed in the relevant position due to vaulting. If the ice bed formed in erosion pit in the point bar or channel bar has a hole or a crack, the mud-silt will drop into the pit with the ice melt water along the hole or crack to form a heaving.

Ice-induced heavings are formed in an exposure and lower temperature ($\pm 0^{\circ}\text{C}$) conditions and their genesis is related to the complex interactions of ice and sand.

Key words ice heaving genesis



图版 I 说明 1,2. 大型圆丘状冰成隆丘。产于冲蚀沟槽中,直径都在 20~30 cm 以上,大者超过 50 cm,其中 2 中的冰成隆丘发育了水位线痕。为冰洞漏积形成。摄于胜利 I 号边滩;3. 密集产出的冰成隆丘。产于河床边缘,顺河流方向分布,摄于胜利 I 号边滩;4~6. 小型冰成隆丘。其上有冰融痕、波痕、水位线痕及流痕。摄于胜利 I 号边滩;7. 中型冰成隆丘,剥去一厚 2~3 cm 的表层后非常平滑,还处在冰冻状态。摄于胜利 I 号边滩;8,9. 大型圆丘状冰成隆丘,其上发育了拱隆形成的裂缝,系冰融塌陷拱隆形成。摄于东张边滩;10. 大型长丘状冰成隆丘,长度在 1 m 以上。其上发育了大量的冰水流痕,其中还可以见到顺层理。摄于东张边滩;11. 不规则台状冰成隆丘,周缘滑塌构造发育。系冰融塌陷拱隆形成。摄于东张边滩;12. 塔柱状冰成隆丘。具有“豆粒”或瘤状结构,系冰融水滞积形成。摄于东张边滩;13. 中大型土堆状冰成隆丘,形貌杂乱。系冰融塌陷拱隆形成。摄于东张边滩;14. 小型火山状冰成隆丘。直径多在 20 cm 以下,但左上角有一直径达 40 cm 的扁平火山状隆丘。摄于胜利 I 号边滩;15. 大型火山状冰成隆丘,直径达 2 m,高 20 cm。中心有一巨大的“火山口”,系冰融印痕。摄于东张边滩;16. 圆丘状隆丘内部的穹隆状层理;17. 冰(雪)层上的融化孔洞。摄于胜利 I 号边滩;18. 冰冻层中发育的冰融水滴蚀坑穴。其下为一层厚约 12 cm 的冰层。胜利 I 号边滩。