

神奇的球状冰(冰球、冰蛋)*

解飞¹, 卢鹏¹, 程斌², 杨倩³, 李志军^{1**}

(1: 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

(2: 芬兰气象研究所, 赫尔辛基 00101, 芬兰)

(3: 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130118)

摘要: 大量球状冰集聚排列是自然界中较为罕见的现象, 一般发生在浅滩、湖岸和河岸处。因球状冰形态特征的特殊性, 常被称之为冰球、冰蛋。球状冰的形成与发展受气象、水动力和水滨地形条件等多因素共同控制, 且具有一定的时空限制, 必须在短时间内多因素协同干预才可能引发冰球集聚。正是凭借“制造”条件的苛刻性导致了冰球集聚现象的罕见, 也造成了全球各地冰球出现的位置、形态和数量之间存在差异。已有来自于德国、俄罗斯、芬兰和加拿大等多个国家关于冰球现象的报道, 但发生频率极少, 约 20~30 年一次。近年来在吉林省的查干湖和四海湖发现了冰蛋现象, 但关于球状冰从形成到大量集聚之间的定量研究依然缺少实测数据分析支撑。毫无疑问, 来自大自然的神奇现象为科学探索研究提供了更多的动力和乐趣。

关键词: 球状冰; 冰球; 冰蛋; 形成条件

Magical spherical ice (ice balls, ice eggs)*

Xie Fei¹, Lu Peng¹, Cheng Bin², Yang Qian³ & Li Zhijun^{1**}

(1: State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P.R.China)

(2: Finnish Meteorological Institute, Helsinki 00101, Finland)

(3: School of Geomatics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, P.R.China)

Abstract: A large number of spherical ice accumulations are relatively rare in nature, and generally occur in shallows, lake banks and river banks. Due to the particularity of the morphological characteristics of spherical ice, it is often called ice balls or ice eggs. The formation and development of spherical ice are jointly controlled by meteorological, hydrodynamic and waterfront topographic conditions, and have certain spatial and temporal constraints. Multi-factor synergistic intervention in a short period of time is required to initiate ice balls to aggregate. Those rigorous conditions leads to the rarity of ice balls agglomeration, as well as the differences in the location, shape and number of ice balls pucks around the world. Up to now, there have been several reports on the ice balls phenomenon from Germany, Russia, Finland, Canada and other countries, whereas the frequency is very rare, about once every 20 to 30 years. In recent years, the ice egg phenomenon has also been discovered in Lake Chagan and Lake Sihai in Jilin Province, China, but the quantitative research on the formation of spherical ice from the formation to mass accumulation still lacks supporting measured data *in situ*. There is no doubt that the magical phenomena from nature provide more motivation and fun for scientific exploration and research.

Keywords: Spherical ice; ice balls; ice eggs; formation conditions

湖冰是冰冻圈的重要组成部分, 随着冰雪运动的普及推广, 千变万化的湖冰表面形态引起了公众的注意。球状冰(冰球、冰蛋)集聚排列是自然界中比较罕见的自然现象, 只有在特定的水文气象条件、湖岸坡度、水深和形状组合条件下出现。国内外尚未形成统一的命名和定义, 冰球是对外形呈球状的凝聚冰的形象描

* 2022-02-16 收稿; 2022-02-23 收修改稿。

国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2019YFE0197600)资助。

** 通信作者; E-mail: lizhijun@dlut.edu.cn.

述. 英文在描述不同地域与形态的冰球时, 使用到 Ball ice、Slush-balls、Ice balls 等. 冰球集聚现象多在入冬时的湖岸、海岸或者河岸浅水区出现(图 1), 直径变化范围一般为 4~100 cm.

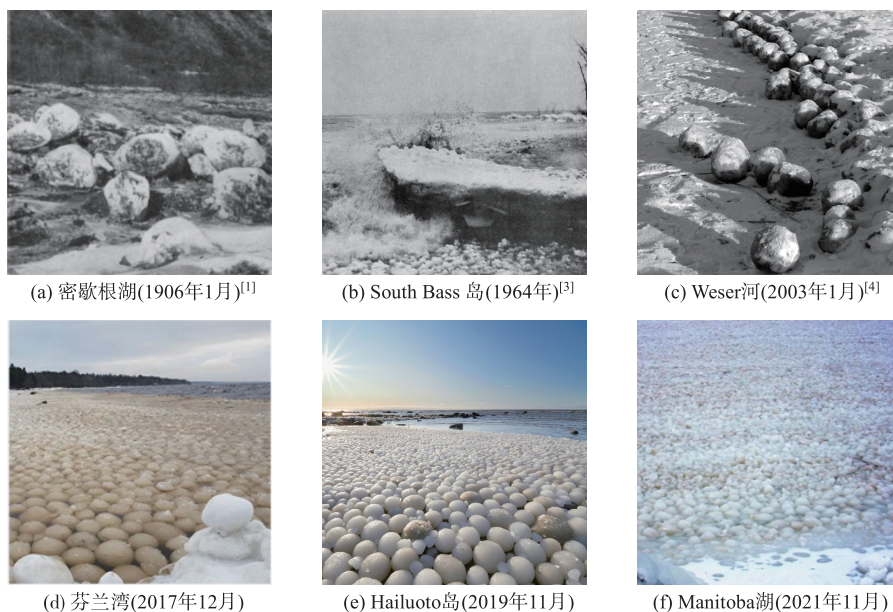


图 1 世界上报道过的球状冰(冰球、冰蛋)现象

Fig.1 The reported ice balls phenomenon in the world

有关球状冰(冰球、冰蛋)的最早记载可追溯到 1906 年 1 月,在北美的密歇根湖(Lake Michigan)近岸一英里的冰面发现一种特殊形态的岸冰,几乎完全由大雪球组成^[1]. 降雪和翻滚的湖水交织冻结是雪球的主要组成. 也就是降落到水面的雪浸水后成为湿雪,它在翻涌的波浪起伏下翻滚,如同滚雪球一样,形成球,并由小变大,由棱角变圆滑. 1948 年 2 月,澳大利亚国家南极考察队的怀亚特·厄普号在南极海域(66°S, 152°E)也发现许多直径为 25~50 cm 的球体漂浮在海面,称为“Ball Ice”^[2],证明了冰球在极地地区的存在. 南极海域中的冰球非常柔软,呈海绵状,以“溪流”的形式排列. 据报道,1964 年冬季受风暴潮的影响,南巴斯岛(South Bass Island)岸边也出现冰球现象,称为“Slush-balls”^[3].

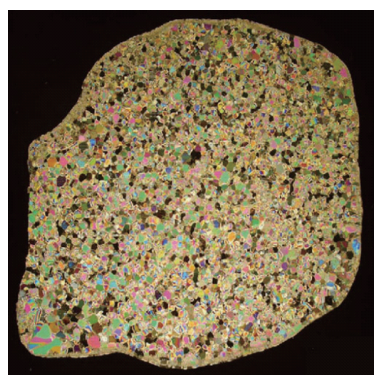


图 2 日本报道的猪苗代湖冰球的内部晶体^[5]

Fig.2 The ice crystals in an ice ball in Lake Inawashiro, Japan^[5]

此外,冰球还存在于河流沿岸,如 2003 年 1 月,德国威瑟河(River Weser)河口观察到了这种奇特的冰现象^[4]. 数量约 500 个,大小近似于足球,单个质量为 4.3~4.7 kg,成排排列,最上面的几排埋在薄冰之中. 据悉,该河口受到强烈的感潮流影响,流速高达 3 m/s,潮差约为 5 m. 在亚洲地区,日本猪苗代湖(Lake Inawashiro)通常在 12 月末到次年 1 月底会存在冰球,称为“Ice balls”^[5]. 切片观察发现冰球的晶体结构由直径为 1~2 mm 的均匀粒状冰组成,晶粒似乎具有随机 C-轴取向,却与一般热力学生长的粒状冰有区别,更接近含有雪粒经过水面动力扰动凝聚再冻结的 S4 型冰晶体(图 2).

随着全球互联网及信息化的发展,近年来更多冰球现象被人们在社交网络分享. 根据俄罗斯卫星通讯社报道,2017 年 12 月,俄罗斯西北海岸的芬兰湾出现了大小一致的冰蛋,直径超过 10 cm,犹如一个个大号的鸡蛋. 2019 年 11 月,位于波罗的海的海卢奥托岛(Hailuoto)沿岸布满了卵状的冰蛋,这也是该地区极为罕

见的现象. 2021 年 11 月,来自不同社交媒体上的新闻显示加拿大马尼托巴湖(Lake Manitoba)同样被大量球状冰覆盖,小的如鸡蛋,大的如篮球. 综上所述,球状冰的形成与集聚受气温、降雪、强风、波浪和浅滩岸坡等自然因素共同控制,因其特殊的形态备受公众关注.

1 球状冰的形成及罕见性

湖泊从开阔水域冻结出稳定的薄冰层,会经历初生冰、尼罗冰、板冰等多个阶段. 初生冰由水直接冻结或雪降至水面后冻结形成,而降雪意味着结冰存在“外援”. 由于初生冰多呈针状、薄片状、油脂状或海绵状,因此它比较松散,能随波浪起伏. 只有发展成尼罗冰,它才稳定,不会随波逐流. 也就是冰蛋的产生只能发生在初生冰阶段,并需要波浪作为推手. 湖泊中的波长和波高均与风速、水深和湖面风向长度有关,当柔软的初生冰随短波起伏运动,就可以出现滚动,其滚圆程度和分布范围就由波长和波高控制. 理论上冰蛋直径间于 $1/4 \sim 1/2$ 波长之间,它随波浪的起伏运动不断增大、圆滑且密实,并顺风向运动到迎风一侧的岸滩搁浅或堆积. 因为水面冻结和降雪都是覆盖整个湖面的,尽管初生冰的厚度小,但它们在湖面都有波浪时形成若干外形近似的冰球,并随风成排集聚在迎风向的岸边,构成景观. 一般岸边水浅,滩涂的温度低,当最前排的冰球搁浅到岸滩上,会和岸滩冻结在一起,它们与岸线平行. 后续的滚球在第一批滚球稳定之后,就在第一排之后成排依次集聚. 至于堆积能否触底、能否数层,就完全决定于风速和持续时间. 这些冰球的总体积不超过正常初生冰和降雪的总量. 如果之后的风能够引起足够的增水,这些滚球就随水冻结. 当增水超过滚球高度,看上去冰球就像冻结在水内. 当然也就有部分被水淹没,冻结后的冰表面会存在不规则的凸起;或者没有淹没,成为岸滩上的雪球.

尽管理论上形成冰球的自然因素都很常见,但实际上几项要素在时空上吻合在一起往往极其稀少. 首先,需要一段时间的缓和低气温促进水温接近冰点^[1],又不至于快速冻结成尼罗冰,给产生冰球提供一个时间窗口;这个出现的概率很大. 其次,即便有产生大量冰球的初生冰体量,一般湖面冻结的往往不够,需要降雪提供外援,而在这个初生冰窗口期还遇上降雪的几率很低. 再者,需要波浪将柔软初生冰逐渐“滚圆”,再通过风把滚圆的球推向迎风侧岸滩^[3],这些都离不开风速和持续的定向风. 此外,具体哪个湖泊哪一侧(或多侧)是浅滩,才可能容易让冰球搁浅、堆积取决于这个湖泊的形状和地形. 但是要令冰球向浅滩方向运动集聚的持续定向风维持程度却因风的随机性而很难. 总之,冰蛋从出现、发育、稳定仅需 2~3 天的初生冰窗口期,此阶段需要气温、风速、风向、降雪同某一个特定形状和地形的湖泊等要素保持完全“配合”状态,在自然界是人为难以掌控的,这也是冰球现象罕见的关键原因.

2 吉林省的“冰球”现象实例分析

吉林省并非首次发生冰球现象,2020—2021 年冬季近似于鹅蛋大小的冰球密密麻麻地排列在在查干湖西南沿岸,2021—2022 年冬季再次出现. 2022 年 2 月央视新闻客户端发布《吉林洮南四海湖呈现“汤圆”湖面! 网友:真应景!》,展示了四海湖国家湿地公园中的“冰汤圆”. 相对于查干湖,四海湖的球状特征更明显(图 3),冰面平整光滑,整体地封存在冰面以下,直径多为 20~30 cm;而查干湖冰面凹凸不平,堆积在冰面之

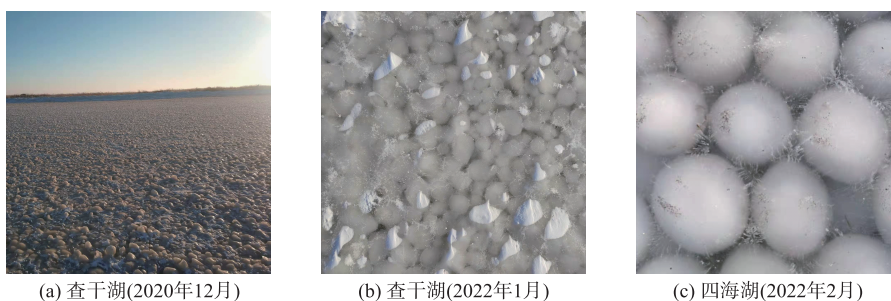


图 3 查干湖和四海湖的冰球现象

Fig.3 Ice balls phenomenon in Lake Chagan and Lake Sihai

上. 它们共同的特点是,冰球集聚分布 2 个湖泊的小部分区域,并非全湖分布.

尽管四海湖的冰蛋报道来源于 2 月,但理论上,它应该产生于初冰期,也就是去年 11 月中下旬期间. 由于初冰期,冰的厚度较薄,存在冰上活动危险,因此没被及时发现. 由于四海湖面积小,目前没有积累大量监测数据. 查干湖是目前国内热门的旅游景区,从冰对冰下生态环境影响角度,这些年积累了一定的现场实测资料. 这里仅作初步分析,从查干湖 2000—2022 年各冬季初冰期的气象条件和 4 个气象要素吻合的次数(表 1)来看,除了负积温、日平均气温比较容易符合,风速、风向和降雪条件就很难同时满足,说明发生冰球集聚的概率非常低.

表 1 查干湖 2000—2022 年各入冬能符合产生冰球的气象条件(下划线数字,需要同时满足)

Tab.1 Critical meteorological conditions required for ice ball formation and aggregation during winter onset in Lake Chagan, 2000–2022

| 年份 | 初封日 (月-日) | 负积温/ ℃ | 初封日前一天气象要素 | | | |
|-----------|--------------|-----------|------------|----------|--------|--------|
| | | | 日均气温/℃ | 风速/(m/s) | 风向/(°) | 降水量/mm |
| 2021—2022 | 11-09 | -19.5 | -4.0 | 12.3 | 20~65 | 10~15 |
| 2020—2021 | 11-20 | -13.0 | -5.8 | 7.2 | 45 | 20.9 |
| 2019—2020 | 11-14 | -19.0 | -6.4 | 3.2 | 293 | 0.7 |
| 2018—2019 | 11-18 | -14.2 | -4.3 | 1.8 | 225 | 0 |
| 2017—2018 | 11-15 | -13.6 | -5.1 | 6.4 | 270 | 0 |
| 2016—2017 | 11-14 | -13.1 | -4.7 | 2.1 | 315 | 0 |
| 2015—2016 | 11-10 | -17.1 | -3.3 | 2.3 | 338 | 0.8 |
| 2014—2015 | 11-14 | -17.1 | -7.7 | 2.2 | 338 | 0 |
| 2013—2014 | 11-12 | -14.7 | -5.7 | 2.4 | 248 | 0 |
| 2012—2013 | 11-16 | -13.4 | -4.5 | 2.0 | 203 | 0 |
| 2011—2012 | 11-14 | -14.6 | -5.5 | 1.9 | 315 | 0 |
| 2010—2011 | 11-14 | -18.8 | -3.9 | 3.1 | 0 | 2.3 |
| 2009—2010 | 11-10 | -19.9 | -7.8 | 2.7 | 22.5 | 0 |
| 2008—2009 | 11-09 | -15.8 | -5.1 | 1.7 | 315 | 0 |
| 2007—2008 | 11-15 | -19.4 | -7.7 | 2.0 | 315 | 0 |
| 2006—2007 | 11-09 | -14.3 | -0.5 | 5.9 | 293 | 0 |
| 2005—2006 | 11-12 | -12.9 | -2.3 | 3.7 | 315 | 0 |
| 2004—2005 | 11-15 | -12.6 | -2.2 | 2.8 | 293 | 0 |
| 2003—2004 | 11-08 | -17.5 | -6.5 | 3.0 | 247.5 | 0 |
| 2002—2003 | 11-05 | -18.5 | -5.7 | 3.0 | 225 | 0 |
| 2001—2002 | 11-06 | -15.8 | -2.9 | 3.3 | 338 | 0.2 |
| 2000—2001 | 11-09 | -20.8 | -7.2 | 3.3 | 270 | 0 |

3 参考文献

[1] Case EC. A peculiar formation of shore ice. *The Journal of Geology*, 1906, **14**(2): 134-137. DOI: 10.1086/621287.

[2] Loewe F. An observation of “ball ice”. *Journal of Glaciology*, 1949, **1**(6): 340. DOI: 10.3189/s0022143000010169.

[3] Langlois TH. The waves of Lake Erie at South Bass Island. *Ohio Journal of Science*, 1965, **65**(6): 335-342.

[4] Eisen O, Freitag J, Haas C *et al.* Bowling mermaids; or, How do beach ice balls form? *Journal of Glaciology*, 2003, **49**(167): 605-606. DOI: 10.3189/172756503781830485.

[5] Kawamura T, Ozeki T, Wakabayashi H *et al.* Unusual lake ice phenomena observed in Lake Inawashiro, Japan: Spray ice and ice balls. *Journal of Glaciology*, 2009, **55**(193): 939-942. DOI: 10.3189/002214309790152500.