

南极鱼的“重生” ——抗冻蛋白知多少

邵宇霏¹, 邢茗然¹, 陈佳佳¹, 陆红健², 沈珍², 陈建成^{2,*}

¹ 南京大学新生学院安邦书院, 南京 210023

² 南京大学化学化工学院, 南京 210023

摘要: 一条夏天出生的南极鱼第一次过冬, 从妈妈那里初识它们过冬的法宝——抗冻蛋白, 并了解了它们抗冻的原理。随后的抗冻比拼让它了解了多样的抗冻机制, 以及抗冻蛋白在生活中广泛的应用。

关键词: 抗冻蛋白; 南极鱼; 甘油

中图分类号: G64; O6

“Rebirth” of Antarctic Fish: What We Know about Antifreeze Proteins

Yufei Shao¹, Mingran Xing¹, Jiajia Chen¹, Hongjian Lu², Zhen Shen², Kin Shing Chan^{2,*}

¹ Anbang Academy, College of First-Year Students, Nanjing University, Nanjing 210023, China.

² School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China.

Abstract: A summer-born Antarctic fish experiences its first winter and learns from its mother about the key to survival: antifreeze proteins and their mechanism of action. Through subsequent challenges in freezing conditions, it discovers diverse antifreeze mechanisms and explores the extensive applications of antifreeze proteins in nature.

Key Words: Antifreeze protein; Antarctic fish; Glycerol

一条小鱼, 和各个大洋中许许多多的小鱼在同一时刻, 新生在夏天的南极海。这条小鱼尚未知道, 它体内的抗冻蛋白究竟有怎样奇妙的力量。

1 抗冻在身好过冬

一晦一明间, 暑往寒来, 凛冬将至。

和小鱼共度了一整个夏秋的玩伴来找它道别, “再见啦! 这几天水温越来越冷, 冬天就要到来了呢, 我要和爸爸妈妈去暖和一点的南方过冬啦。明年夏天我们还要在这里一起玩噢!” 小鱼似懂非懂, 懵懵地点头。

小鱼孤零零游回家, “妈妈, 我的好朋友们都去南方过冬了, 我们什么时候出发呀?” 妈妈笑得眉眼弯弯, “宝贝, 我们可以一直安安稳稳地待在南极海的家里, 不用向南方游哦。”

“啊? 可是, 它们都说南极的冬天太冷, 我们会被冻得受不了的。”

妈妈想起来, 自打夏天出生后, 还没有人和小鱼讲过这些道理: “我们和其他的同伴不一样的

哦。在我们的身体内呀，有一种很特别的蛋白质，叫做抗冻蛋白，也可以说AFP。当外面温度降到0 °C以下时，AFP (Antifreeze protein)的亲水面会和我们体内生成的小冰晶的表面进行结合，阻止小冰晶的进一步生长^[1]。于是呢，即使长时间生活在冰点以下的南极海，我们身体内的水分依然不会冻结，细胞内外的生理活动还是可以进行得很好，不用担心身体状况的问题啦。”

“真的嘛？我的身体里竟然有这么神奇的蛋白！”

小鱼的哥哥早早注意到了身边的对话，这时也看着正满脸惊喜的小鱼开口：“甚至有可能比你想象中的还要神奇哦。我们鱼类体内的抗冻蛋白可以根据结构特征的差异分为很多不同的类型。比如说，有一种I型AFP，它在低浓度时通过结合冰晶的锥面来表现出抗冻活性，如果浓度增加的话，它甚至可以吸附冰晶所有取向的表面来表现出更高的抗冻活性。”

小鱼望着正滔滔不绝的哥哥，边听边撇着嘴点头。

“你还记得鲱鱼、彩虹鱼和日本胡鱼吧？”

“当然！”小鱼的眼神里一下子有某种东西被点亮，快乐地扬起了下巴，“它们可是我最好的朋友！”

“我就知道。”哥哥轻轻笑，“它们体内的II型AFP呢，是一种很特别的球状结构，Ca²⁺的诱导可以使这些AFP进行构象的改变，从而更轻松地和冰晶结合。”

“这么厉害！那还有其他的种类嘛？”

“嗯……除了几种AFP之外，其实还有一种叫做AFGP的抗冻糖蛋白(图1)，它具有重复序列‘Ala-Ala-Thr’^[2]，可以抑制冰晶在棱柱面上的生长。有一些人类科学家说，AFGP还可以结合冰晶的基面和锥面，并在它的外部逐渐发育，在基面上形成六角形的凹坑，从而抑制冰晶的生长。还有呢……”

小鱼听得云里雾里，看着哥哥连比带划的讲解渐渐走了神。它望着朋友们离开的方向，悄悄念叨着，“太好了，我可以安心等着我的好朋友们，等它们明年夏天回南极海再来找我一起玩。”

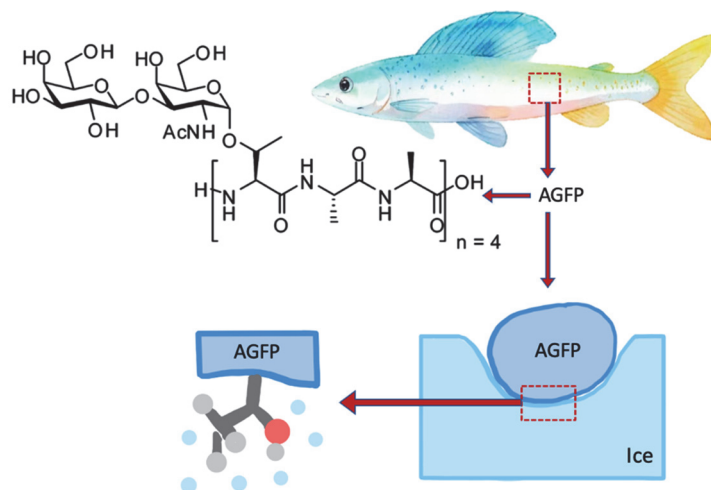


图1 AFGP的抗冻糖蛋白

2 抗冻本领比比看

冬尽春来，万物复苏，小鱼从沉睡中悠悠醒来，身边的大地换上了新颜，周围都是陌生的面孔。远处熙熙攘攘，似乎是在比拼抗冻的本领，它也加入了比赛。

2.1 木蛙——自然界的冰雕师

首先发言的是木蛙，它昂首挺胸，夸耀自己的本领：“想象一下，如果你可以在冬天被冰封，春天再次苏醒，这将是怎样的体验？对我来说，这可不是想象，而是我生活的一部分。在冬日被冰封之时，我能够将体内的水分转化为冰晶，同时产生一种天然的‘抗冻剂’——冰蛋白。这种独特

的物质可以绑定到小冰晶的表面，阻止它们在细胞外部的生长和聚集。防止了细胞内的水分完全结冰，从而保护细胞不被破坏。我们体内还会积累一些其他类型的蛋白质和糖类物质，这些物质可以帮助维持细胞膜的稳定和完整性，即使在细胞外部的水分冻结的情况下。这种保护作用帮助细胞避免了因冻融循环而可能发生的损伤。随着体外液体的冻结，我体内的溶质浓度会上升，这有助于保持细胞内外的渗透压平衡。这种机制避免了因冰冻造成的细胞脱水现象，有助于维持细胞的生命活动。当寒流来袭，周围的世界变成了一个冰封的王国时，我们在冰冷的环境中进入休眠状态，等待春风吹暖大地，就再次‘复活’，继续生活旅程！”

2.2 南极鱼(美洲拟鲈)——寒冷深海的舞者

木蛙刚说完不久，小鱼就凑到前面，抢着回答：“你仅仅是让冰晶生长在细胞外，而我们能阻止冰晶的形成。我们体内有一种私人定制‘防冻液’——抗冻蛋白^[3]。它是一种单链 α 螺旋类AFPs，在这个‘防冻液’的N端头部结构还有8个由氢键组成的有序网络，其中的极性氨基酸残基可以和两个水分子形成紧密结合。正是这么一个精密的结构，我这‘防冻液’在溶液中可稳定了。它的亲水面与冰晶结合，干扰冰晶生长，从而阻止在我体内水分结成大块的冰晶，使得我即使在冰点以下的水温中也能保持活力。这种抗冻蛋白如同海中的魔法，让我们能够在冰点以下的水域中自由翱翔，不受束缚。我们向世界证明，即便在最为严寒的环境下，生命依旧可以自由地绽放光彩！”

2.3 黄粉虫——美洲大陆的冷寂战士

那些小巧但坚韧的黄粉虫也不容忽视，它们高高举起触角，开始指指点点：“我们也有抗冻蛋白，甚至比你们的AFP在抑制结冰上更有效呢^[4]！我们的抗冻蛋白具有环状的 β 片层，中间具有支撑结构，这使得蛋白很稳定。 β 片层间距离和沿螺旋方向距离可以与水分子之间形成完美的匹配。这种间距的匹配使得我的抗冻蛋白与水分子结合更加紧密。

“另外，我们的体液中富含甘油，这种天然化合物可以降低体液的冰点。即使在零下的温度下，我们的体液也难以结冰。并且甘油与水分子的亲和，会减少可用于形成冰晶的自由水分子，产生‘胶体渗透压效应’来阻止细胞内外的水分结冰。还有，甘油可以在低温环境中稳定细胞膜和蛋白质的物化结构，防止因冰晶形成而导致的膜损伤和蛋白质变性。”

小鱼听了黄粉虫的讲述，不禁有点沮丧：“看来还是你们的抗冻能力强啊。”

黄粉虫安慰道：“不要伤心，这是因为我们的生存环境不同。你们生活在水里，水的冰点是 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，你们基本不会经历 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的低温；而我们陆生的昆虫，会经历甚至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温，所以我们的抗冻蛋白不得不有更强的抗冻能力。不过不管抗冻能力比拼结果如何，在自己的环境中生存的好才是最重要的。”

木蛙补充道：“这些生理机制，是生命的顽强，是进化的奇迹！”

3 抗冻应用早知道

时光流转，严冬不再。小鱼迎着春光，继续丰富多彩的生活。

3.1 以“冻”制冻——应用AFP的冰淇淋

春光正好，小鱼在水上自在地嬉戏，它买了一根冰淇淋，冰淇淋丝滑软糯的口感让它陶醉。想起以前嚼过的硬硬的大块冰晶，不禁心生疑惑。

“妈妈，冰淇淋为什么具有这样的质地呢？”

鱼妈妈把配料表给小鱼看，上面赫然写着一项：AFPs。

小鱼大吃一惊：“这是我们身体里存在的东西，加进去该不会有问题吧？！”

“别怕，多糖和AFPs正是因为它无毒的特性才被广泛使用的^[5]。这些防冻添加剂能让冰淇淋免受形成大冰晶之苦。”小鱼又接着问，想听更多的内容。

“在冰淇淋产品中，玻璃化转变温度是评价冰淇淋在储存过程中热力学稳定性的一个指标。AFPs可以提高冰淇淋的重结晶、耐融性和玻璃化转变温度^[6]。实验表明，将冬黑麦AFPs添加到冰淇淋中

时, 冰淇淋中的冰晶明显变小, 再结晶受到抑制, 冰淇淋质地更顺滑, 提高冰淇淋对温度波动的耐受性^[7]。将0.1%的AFPs添加到冰淇淋中, 使得玻璃化转变温度从-29.14 °C增加到-27.74 °C, 有效提高了冰淇淋的抑制重结晶和耐融化性^[8]。

小鱼盯着手里的冰淇淋, 喃喃道: “原来抗冻蛋白对冰淇淋有这么大的作用。”

妈妈笑着说: “不仅如此呢, AFPs还可以降低冷冻面团中的可冻水含量, 改善馒头的质地。在肉类保鲜时, AFPs通过不可逆地附着在冰晶表面, 抑制冰晶的生长, 进而改变冰晶的形态, 抑制再结晶, 提高冷冻肉制品的生物抗冻能力, 提高肉饼硬度和弹性。”

小鱼连连点头。

3.2 霜冻不“冻”——作物抗寒保护

小鱼游到水边, 发现农民伯伯的袋子上似乎也写着AFPs的字样。

原来, AFPs因具有维持细胞溶液过冷状态和对冰晶的控制能力, 在抵御低温伤害方面发挥关键作用。利用基因工程的方法, 得到具有抗冻蛋白基因的转基因植物, 能显著提高其抗冻性。

小鱼游历四方, 发现抗冻蛋白竟然有这么多应用。“以后我也要多多探索啊。”它说。

参 考 文 献

- [1] Perez, A. F.; Taing, K. R.; Quon, J. C.; Flores, A.; Ba, Y. *Eur. Biophys. J.* **2018**, *47*, 611.
- [2] Mahatabuddin, S.; Hanada, Y.; Nishimiya, Y.; Miura, A. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 42501.
- [3] Sicheri, F.; Yang, D. S. *Nature* **1995**, *375*, 427.
- [4] Liou, Y. C.; Tocilj, A.; Davies, P.L.; Jia, Z. *Nature* **2000**, *406*, 322.
- [5] Provesi, J. G.; Valentim Neto, P. A.; Arisi, A. C. M.; Amante, E. R. *Food Chem.* **2019**, *289*, 65.
- [6] Cao, H.; Zhao Y.; Zhu, Y. B. *Food Chem.* **2016**, *194*, 1245.
- [7] Kaleda, A.; Tsanev, R.; Klesment, T. *Food Chem.* **2018**, *246*, 164.
- [8] Zhang, Y. J.; Zhang, H.; Ding, X. L. *Food Bioprocess Tech.* **2016**, *9*, 1746.