

极地微藻的研究进展

Advances on the research of polar microalgae

梁晓芸¹, 魏东¹, 刘龙军¹, 陈峰^{1,2}

(1. 华南理工大学 轻工与食品学院, 广东 广州 510640; 2. 香港大学 植物学系, 香港)

中图分类号: Q935

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)04-0092-04

两极地区是地球上地理环境很特殊的区域, 低温、高光照和强辐射是其环境的主要特点。冰雪大地的温度从来不超过 0℃; 由于阳光的直射、冰雪的反射和散射, 使得光照强度极高, 被称为地球上光照最强的地方。近几十年来臭氧层的破坏日益严重, 致使两极地区紫外线辐射强度大幅增高, 一般生物无法生存^[1,2]。

1585 年 Davis 在北极第一次发现雪藻 (*Chlamydomonas nivalis* Wille), 揭开了人们研究极地微藻的历程。极地微藻可以很好地适应极端环境, 如低温、营养缺乏、极端酸性以及高山和极地的强紫外线辐射等^[2,3]。在这种极端环境中, 极地微藻可以不受高光强 (86 000 lx) 的限制, 在 0℃ 仍有光合活性, 不被 UV 辐射抑制; 细胞光合作用产生有机物 (有机酸、多糖) 分泌到环境中, 使环境 pH 值降低。有一套有效的抗胁迫体系保护极地微藻的光合系统、生物膜系统和酶系统, 以保证微藻细胞生理活动正常进行。因此, 研究极地微藻的抗冻、抗氧化和抗辐射特性具有十分重要的理论意义和实际应用价值。

1 极地微藻的种类与生态分布

极地微藻主要分布在南、北极地区和高海拔雪山上。它们可以在海冰中大量繁殖, 使海冰表面呈棕色; 还可利用夏季的有利条件形成浓密的藻华。在每年夏初, 冰体裂解后, 微藻就构成了南极地区重要的生物量和能量流^[2,4,5]。

在极地和海拔地区发现的大部分微藻是雪藻。一般它可在雪地上形成大团藻华, 使雪看上去呈红色^[6,7]。

雪藻包括运动细胞和静止细胞。在有利的温度和光照下, 大多数细胞是运动的, 顶端有两条鞭毛; 当这些细胞在一个地方逗留或积极运动时, 鞭毛就会旋转震动。培养获得的运动细胞不久就会脱掉鞭毛, 顶端突起部分可以表示鞭毛存在过的位置^[8]。不动细胞直径是 20~50 μm, 在母细胞里有 2~16 个子细胞^[8,9]。野外观察到的雪藻群落一般是由红色“静止

细胞”组成的, 这些细胞在形状上明显不同, 其中, 豆形、椭圆和球状的细胞占群落的 90%^[9,10]。

世界上发现的极地微藻已经超过 110 种。传统的显微镜分析方法和形态学描述不能充分分析海冰上极地微藻的多样性, 因此人们开始使用分子技术进行研究^[11]。

2 决定极地微藻生长和存活的环境因子

2.1 温度

适合极地微藻生长的温度接近 0℃。在休眠状态下, 微藻甚至可以忍受低于 -35℃ 的完全冰冻条件。如极地微藻 *Pyramidomonas* sp. 和 *Chlorophyceae* L-4 都属于嗜冷藻, 生长在南极严寒条件下, 最适生长温度为 0~10℃。雪藻生活在接近 -8~-1℃ 的雪或冰中。目前, 已经发现它的最适生长温度也是在 0~10℃ 之间, 有 4 份的报道, 同时雪藻作为好寒性物种甚至能够在低于 -35℃ 条件下生存。当温度低于水的凝固点时, 藻便进入休眠状态^[8]。在极地环境中, 脂肪堆积及脂肪酸组成是极地微藻生存的关键之一, 随后发现雪藻的红色和绿色细胞的冰冻行为的确不同^[2]。

2.2 紫外辐射

通常情况下, UV-B 能够降低微藻的光合作用速率, 改变藻类色素的组成, 降低藻类的生长速率, 以及引起多种类型的细胞损伤, 包括 DNA 损伤、膜损伤和受光照抑制的光合作用, 并通过对核酮糖二磷酸羧化酶-加氧酶的数量和活性的影响减少碳元素含量^[15]。但已有的研究表明, 南极微藻含有 DNA 损伤的修复机制, 还可以合成抗紫外线物质来吸收紫外线,

收稿日期: 2005-07-28; 修回日期: 2006-04-07

基金项目: 广东省自然科学基金项目

作者简介: 梁晓芸 (1979-), 女, 硕士, 研究方向: 天然糖质分离纯化新方法新技术, E-mail: lxy791115@163.com

使得一定强度内的 UV-B 不会对细胞造成伤害。此外,UV-B 还可以影响微藻的保护酶系统(例如:超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶等)、影响自由基的产生速率。以南极微藻 *Chlorophyceae* L-4 为例,UV-B 辐射的初期,在低强度 UV-B 辐射胁迫下,保护性酶的活性先迅速提高,然后又很快恢复到基本水平;而当 UV-B 辐射增强时,*Chlorophyceae* L-4 中一些保护酶活性也随着明显增强,在高强度的辐射下,酶活性更高;*Chlorophyceae* L-4 中的抗坏血酸过氧化物酶的活性在 UV-B 辐射增强的胁迫下略有升高或变化不大;在生化组成上,总蛋白含量显著改变(脯氨酸、羟脯氨酸等 6 种氨基酸增加,谷氨酸、缬氨酸等减少),总脂含量明显增加,饱和脂肪酸含量降低而不饱和脂肪酸含量增加,有一些新的不饱和脂肪酸产生;Mg、Na 和 Al 元素的含量显著降低,而 Fe、Ca、Zn、Mn 等含量却明显增加^[16]。

2.3 光强与水势

微藻光合作用中饱和光强度接近 54 000 lx,但是当光强逐渐增大超过 86 000 lx 时,光合作用就会被抑制^[8]。研究表明,南极冰藻的细胞中含有 R-藻红蛋白,这种藻红蛋白使冰藻可以吸收蓝光,因此,冰藻在缺少光照的环境中也能够生存^[17]。

对水势的研究表明,微藻对减少水势是相当敏感的。水势也可影响光合作用。将少量的保水物质(如 0.03 mol/L NaCl、0.04 mol/L 蔗糖或 0.02 mol/L 丙三醇)加入到藻悬浮液中就会抑制光合作用的发生^[9]。低水势也被认为是引起南极冰藻的低光合作用的一个原因。此外,大量的融雪也会抑制光合作用发生^[9]。

2.4 金属与微量元素

雪藻具有富集金属离子的强大能力,其体内的离子浓度可高于体外的成千上万倍。镁等金属离子有利于促进植物的生长,甘氨酸镁对南极微藻有显著的促进生长作用^[18]。雪藻可耐受 NaCl 浓度的半致死剂量为 1.2 mol/L;绿色和红色细胞中都富含钙、磷、硫和硅,而红色细胞中钙含量较低。实验分析表明在含有雪藻的雪地上可以发现 Si、Fe、Ca 和 K 元素。Fe 在雪藻中有最大的累积浓度,是生物体至关重要的一种物质^[19]。

3 极地微藻的抗胁迫成分及其功能

3.1 抗氧化物质

3.1.1 类胡萝卜素

在海拔 3 000 m 以上分布的藻,其所受到的 UV

辐射比海平面要高出 30%,极地被认为是地球上光照最强的地方,两极地区近年来臭氧层破坏日益严重,使得紫外线辐射强度更高,而极地微藻却可以在这种极端环境中生存,可见它必然有一套行之有效的强大抗氧化保护机制^[2]。

极地冰藻在光氧化和生理胁迫条件下都会产生几种有害的活性氧,如单线态氧和氧自由基。氧自由基会攻击细胞膜上的不饱和脂肪酸,过度氧化的脂肪酸能通过链式反应产生更多的脂肪酸自由基,从而打破生物体自由基与抗氧化剂的平衡。单线态氧的能量比基态高,可和双层脂膜反应,破坏脂膜和机体其他的关键组成部分,如使蛋白质失活、DNA 损伤等。虾青素作为一类红色天然类胡萝卜素,是自由基的强大淬灭剂,具有超强的抗氧化活性,被誉为“超级抗氧化剂”^[20]。雪藻在营养丰富和低光强下保持绿色并快速生长,而在营养贫乏和高光强下细胞生长减缓并开始积累大量红色类胡萝卜素——虾青素,这使得雪藻呈红色。由此可见,类胡萝卜素可作为光保护剂抵抗光、氧的有害作用,或作为化学反应物抵抗细胞所产生的化学物质引起的氧化损伤。类胡萝卜素可以通过一个三重线态—三重线态的能量传递过程消除单线态氧的产生,或者类胡萝卜素也可以通过自身的能量传递或化学反应来淬灭单线态氧^[20]。类胡萝卜素的积累量主要受氮缺乏的影响,同时磷、硫、钾和铁的损耗,也会影响微藻细胞色素的累积。雪藻的绿色细胞不含有次级类胡萝卜素(主要是变胞藻黄素),而静止细胞和休眠合子却有含量很高的变胞藻黄素和变胞藻黄素酯^[2]。

3.1.2 酚类物质、脯氨酸

在 UV 照射下,特别是在 UV-C 照射下,雪藻被刺激产生酚类抗氧化物质。这种物质可以阻碍最终使细胞膜退化的破坏性链反应的发生,还可以防止紫外辐射诱导癌细胞的发生^[21]。脯氨酸不受 UV-A 的影响,但是当雪藻被 UV-C 照射时,研究发现脯氨酸有大幅度的增加。

3.2 抗辐射物质

3.2.1 多糖

在极地环境中,UV-B 辐射能诱导冰藻细胞产生大量的胞内多糖和附着藻体的胞外多糖物质。正是由于这些物质的存在使得 UV-B 在进入细胞之前已被减弱或滤除,以减小一定强度范围内的 UV-B 对细胞的伤害^[22]。缪锦来等^[23]在实验室人工模拟南极 UV-B 辐射环境,对 4 种南极冰藻的生化组成变化进行了测定和分析。结果表明,4 种南极冰藻的灰分含量显著下降,说明南极冰藻能通过调整自身适应强辐

射环境。

3.2.2 水溶性和脂溶性 UV 吸收色素

UV-B 诱导南极冰藻形成一类新的水溶性和脂溶性 UV 吸收色素,该色素属于 MAAs (氨基酸糖苷) 类化合物,它在 310 nm 左右有强烈的光吸收,而且可以分泌到培养液中,通过清除自由基成为抵御紫外辐射的屏障之一^[24]。

3.3 抗冻成分

在极地环境中,抗冻蛋白、脂肪的堆积及脂肪酸组成以及某些无机离子都可能是南极冰藻能够在低温下生存的条件^[21]。

3.3.1 脂肪酸

南极冰藻的脂肪酸组成及总脂含量与其低温适应性关系的研究表明,一些硅藻主要是通过单不饱和脂肪酸的累积来抵抗低温胁迫的;绿藻是通过提高胞内的多不饱和脂肪酸含量来抵抗低温胁迫^[24]。由此可见,冰藻的红色不动细胞中含有大量脂肪酸,能够降低细胞冰点,保证细胞膜在低温下有足够的流动性,以维持正常的细胞代谢活性。再加上大量虾青素脂也降低了细胞的含水量,减少了冰晶形成对细胞的损伤。

3.3.2 抗冻蛋白

冰藻体内的抗冻蛋白也可直接与冰核表面相结合,使溶液的凝固点降低,防止冰核生长,延迟结冰。而且当热扰动使冰核破碎时,抗冷蛋白又可重新游离出来行使它的功能^[25]。抗冻蛋白可以使水溶液产生热滞后作用,也可以抑制冰再结晶过程^[26]。

3.3.3 活性物质

在南极浮冰表面存在着大量影响冰形成的物质,如一种可修改冰晶形式的大分子物质,被称为冰活性物质 (IASs)^[27,28]。它可抑制冰形成,类似鱼的抗冻蛋白,但是它不能显著降低冷冻温度,所以又不同于抗冻蛋白。在最近的研究中发现,冰活性物质可以抑制冰的重结晶,增加生物体抵抗严寒的能力,同时保护细胞在冰冻-解冻循环中免受损伤。现在研究的 Berkleya 和 Navicula 冰活性物质样品表明,在大约 13 mg/L 和 11 mg/L (蛋白质+碳水化合物) 浓度下冰活性物质能够完全抑制冰的重结晶^[28-30]。

4 结论与展望

目前,国际上对极地微藻的研究主要集中在藻的分类、生活史、繁殖方式、生态和地理分布,以及细胞超微结构等方面。国外对雪藻的研究较多,国内近两年虽然对胁迫条件下藻类的适应机制等方面的研究取得了一些进展,但研究工作都刚刚开始,进一步深入系统的研究尚有广阔的发展空间。

参考文献:

- [1] Hoham R W. Optimum temperatures and temperature ranges for growth of snow alga[J]. **Arctic and Alpine Research**,1975,7(1):13-24.
- [2] M üler T, Fuhr G. Snow algae from northwest Svalbard: their identification, distribution, pigment and nutrient content[J]. **Polar Biol**, 1998,20:14-32.
- [3] Erdingstad E, Kemp K, Fjordingstad E, et al. Chemical analyses of red "snow" from East Greenland with remarks on *Chlamydomonas nivalis* (Bau.) Wille[J]. **Arch Hydrobiol**,1974,73(1):70-83.
- [4] Gradinger R, N ürnberg D. Snow algal communities on arctic pack ice floes dominated by *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille[J]. **Polar Biol**,1996,9:35-43.
- [5] 侯旭光,姜英辉,李光友. 南极冰藻的总脂含量及脂肪酸组成与其低温适应性的关系[J]. **黄渤海海洋**,2002,20(1):47-53.
- [6] Thomas W H. Observations on snow algae in California[J]. **J Phycol**, 1972,8:1-9.
- [7] Grinde B. Vertical distribution of the snow alga *Chlamydomonas nivalis* (Chlorophyta, Volvocates) [J]. **Polar Biol**, 1983,2:159-162.
- [8] Kawecka B, Drake B G. Biology and ecology of snow algae 1. the sexual reproduction of *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille [J]. **Acta Hydrobiol**, 1978,20(2):111-116.
- [9] Kawecka B. Biology and ecology of snow algae 2. formation of aplanospores in *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille (Chlorophyta, Volvocales) [J]. **Acta Hydrobiol**, 1981,23(3):211-215.
- [10] Mosser J L, Mosser A G, Brock T D. Photosynthesis in the snow: the alga *Chlamydomonas nivalis* (Chlorophyceae) [J]. **J Phycol**,1977,13:22-27.
- [11] Mock T, Thomas D N. Recent advances in sea-ice microbiology [J]. **Environmental Microbiology**, 2005,7(5):605-619.
- [12] Yoshimura Y, kohshima S, Ohtani S. A community of snow algae on a Himalayan glacier: change of algal biomass and community structure with altitude[J]. **Arctic and Alpine Research**,1997,29(1):126-137.
- [13] 姜英辉,侯旭光. 两种南极冰藻的形态和超微结构观察[J]. **高技术通讯**,2001,8:29-33.
- [14] 刘鹏,缪锦来. UV-B 增强对南极蓝藻形态和超微结构影响的研究[J]. **海洋科学**,2004,28(5):21-25.
- [15] Gorton H L, Vogelmann T C. Ultraviolet radiation and the snow alga *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille[J]. **Photochemistry and Photobiology**, 2003,77(6):608-615.
- [16] 缪锦来,阚光锋. 4 种南极冰藻的生化组成对 UV-B 辐射增强的响应[J]. **海洋科学**,2004,28(9):26-31.
- [17] Samsonoff W A, MacColl R. Biliproteins and phyco-

- bilisomes from cyanobacteria and red algae at the extremes of habitat [J]. **Arch Microbiol**, 2001, 176: 400-405.
- [18] Mock T, Kroon M A. Photosynthetic energy conversion under extreme conditions-I: important role of lipids as structural modulators and energy sink under N-limited growth in Antarctic sea ice diatoms [J]. **Phytochemistry**, 2002, 61 :41-51.
- [19] 缪锦来,王波. 南极微藻 *Chlorophyceae* L-4 抗氧化酶活性对 UV-B 辐射增强的响应[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(3) :313-319.
- [20] Fjerdingstad E. accumulated concentrations of heavy metals in red snow algae in Greenland[J]. **Hydrologie**, 1973 :247-251.
- [21] 侯旭光,李光友. 南极冰藻(硅藻)细胞质中无机离子的变化与低温适应性的关系[J]. 高技术通讯, 2002, 6 :96-100.
- [22] Duval B, Shetty K, Thomas W H. Phenolic compounds and antioxidant properties in the snow alga *Chlamydomonas nivalis* after exposure to UV light [J]. **Journal of Applied Phycology**, 2000, 11: 559-566.
- [23] 缪锦来,李光友. 甘氨酸镁对南极冰藻促生长作用研究[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(1) : 41-46.
- [24] 魏东,严小君. 天然虾青素的超级抗氧化活性及其作用[J]. 中国海洋药物, 2001, 4 :45-50.
- [25] 缪锦来,李光友,侯旭光,等. UV - B 辐射对南极冰藻中抗辐射物质的诱导作用[J]. 高技术通讯, 2002, 4 : 92-96.
- [26] 刘晓妹,范晓,韩丽君. 海藻中类胡萝卜素的研究综述 [A]. 中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊 (41) [C]. 北京:科学出版社, 1999. 92-101.
- [27] Raymond J A, Fritsen C H. Semipurification and ice recrystallization inhibition activity of ice - active substances associated with Antarctic photosynthetic organisms [J]. **Cryobiology**, 2001, 43 :63-70.
- [28] Raymond J A, Janech M G. Cryoprotective property of diatom ice-active substance [J]. **Cryobiology**, 2003, 6: 203-204.
- [29] Raymond J A, Knight C A. Ice binding, recrystallization inhibition, and cryoprotective properties of ice-active substances associated with Antarctic sea ice diatoms [J]. **Cryobiology**, 2003, 46:174-181.
- [30] Doucet C J, Byass L. Distribution and characterization of recrystallization inhibitor activity in plant and lichen species from the UK and maritime Antarctic [J]. **Cryobiology**, 2000, 40: 218-227.