

# 空间环境导致的藻类生物学效应\*

胡章立 刘永定

(中国科学院水生生物研究所 武汉 430072)

## 摘 要

藻类空间生物学效应研究目前已从“发现效应”(第一阶段)转入到“揭示效应的分子机理”(第二阶段)的新阶段,涉及的研究层次包括种群、群体、个体、组织细胞和分子的各个方面。本文拟就空间环境导致的藻类生物学效应研究作一综述。

**关键词** 藻类 — 空间环境 — 生物学效应 — 回转器

## 1 引 言

地球生物是在1g重力场及地球大气层的辐射保护之下,经过三十多亿年的进化演替发展而来的,它们一旦进入空间,其生存的环境将彻底改变,微重力、强辐射以及其它空间环境因素将使得生物体及其各种生命现象发生与地面大相径庭的变化。观察并研究这些变化,认识其中的本质规律是人类进入空间所不可逾越的任务。也就是说,要想使地球生物进入太空并生存下来,首先必须弄清的问题就是地球生物在空间环境中的生物学效应问题。

作为原初生产者,藻类特别是微型藻类由于其诸多适应于空间研究与应用的特性而在空间生物学研究中具有十分重要的作用。具体表现在以下几个方面:(1)藻类的原植体简单,无根茎叶的分化,空间利用率高;(2)藻类生长周期短、生长繁殖快;(3)藻类光合效率高,能量需求低;(4)藻类代谢生产性能高,代谢屈曲性大,能在不同的CO<sub>2</sub>浓度范围内有效地进行新陈代谢;(5)能进行液体密集培养;(6)细胞含有采收不同波长光能的天线色素,具备有效的光能转换系统;(7)生长代谢过程中无污染产生;(8)许多藻类生物含蛋白高,其营养组成齐全,配比合理。

藻类的这些特性使它们既可以作为理想的空间生物学研究模式生物,又特别适合作为受控生态生命支持系统(CELSS)的最佳组成成份。一方面藻类的光合放氧对将来长期空间飞行的供氧和废水再生有重要作用;另一方面藻类生物量的组成成份以及能够在空间密集培养的特性使它可能成为一种空间最理想的食品资源。

由此可见,弄清空间环境导致的藻类生物学效应对人类空间探索具有十分重要的意义。

\* 国家载人航天工程资助项目

## 2 空间环境导致的藻类生物学效应

### 2.1 用于空间生物学效应研究的藻类材料

目前用于空间生物学的藻类有许多种, 主要集中在蓝藻、绿藻、杂色藻及褐藻等类别中, 其中尤以对蓝藻和绿藻的研究居多(见表 1)。

### 2.2 形态结构变化

**细胞壁** 藻类细胞壁在空间环境中的变化情况与藻类细胞的种类及空间飞行时间的长短相关<sup>[26]</sup>。一般来说, 短期的空间飞行(8 天内), 细胞壁结构的变化不很明显。我们在对小球藻经 8 天空间飞行后的亚显微结构分析中没有发现细胞壁结构的明显变化。其它低等植物如藓类原丝体在地面回转器实验也得到类似的结果<sup>[27]</sup>。

在长期空间飞行(15—30 天)中, 细胞壁的结构明显变薄, 葫芦藓的原丝体在经过 96 天轨道站生长后, 其细胞壁比对照的薄 3 倍<sup>[43]</sup>。在飞行细胞中, 细胞壁超微结构变化, 结构松弛, 以及胞间连丝和片层结构缺失在不同种类的藻及植物细胞中都有发现。

我们在藻类短期(7 天)回转器实验中没有发现细胞壁结构的明显变化。Sytnik 等<sup>[43]</sup>在藓类原丝体短期回转器试验中也没有发现与对照的差异。在长期的回转器试验(30 天)时, 细胞壁则出现与空间飞行类似的结果, 细胞壁变薄, 壁成份水解及部分结构破坏, 并发现纤维素的微纤丝通过细胞质膜并入液泡中。Nedukha 等<sup>[26]</sup>认为空间及微重力胁迫导致的细胞壁结构的变化是通过细胞质膜结构与功能的变化以及质体代谢变化而引起的。

**细胞膜系统** 微重力能引起细胞质膜理化特性的变化, 从而改变膜的透性。对没有特别重力感受器的单个细胞来说, 这种改变会引起一系列的代谢变化。Tairbekov 等<sup>[44]</sup>先后对重力变化与膜脂脂肪酸组成之间的关系进行了研究, 发现在空间微重力环境、回转器实验及由离心产生的过重力 3 种情况下膜系统脂肪酸组成变化很大。在微重力及回转器实验中膜系统不饱和脂肪酸含量比例最大, 而离心情况下饱和脂肪酸的含量比值最大, 1g 对照则介于两者之间。我们在盐生杜氏藻回转器实验中也发现膜磷脂与膜蛋白的比率发生了变化。Yarlikova 等<sup>[47]</sup>报道空间飞行引起红细胞膜中性脂和磷脂组成的变化进一步说明了空间环境与膜系统密切相关。由此可见, 空间环境不仅会影响到细胞膜系统形态及功能特性上的变化, 而且还能引起其理化特性发生有深远意义的改变, 并进一步影响到细胞的代谢活动。Zhadko 等<sup>[49]</sup>在空间飞行及回转器实验中发现的小球藻细胞膜脂质过氧化现象就是直接的证据。

**细胞器** Popova 等<sup>[33,35]</sup>以小球藻为实验材料对空间环境导致的藻类细胞内细胞器的超微结构变化进行了较详尽的分析。从实验数据可以看出, 空间飞行会导致正在生长的小球藻一系列复杂的反应。这些生物学效应的产生因藻细胞的生理状态、藻细胞在空间的培养方式以及培养时间的长短而有所不同。对培养在固体培养基的藻细胞来说, 经过短期的空间飞行(4—5 天)后, 质体膜系统的相对体积有轻微的变化, 在质体基质中有明显的电子透明区域。同时, 也观察到非常大的线粒体以及线粒体周围环排列的增大了许多的

表 1 用于空间生物学研究的一些藻类材料

藻种	研究者	时间	主要目标
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Meleshko G I	1970	飞行器气体再生
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Karel M	1986	作为 CELSS 中食品资源可能性研究
<i>Anacystis nidulans</i>	Wiltberger N	1987	微重力环境中藻类的生长和采收
<i>Nostoc</i> sp.	Lefort-Tran et al	1987	藻在空间的生长特点和生化特性
<i>Fucus serratus</i>		1973	种群空间竞争
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Oguchi M	1988	固氮蓝藻在 CELSS 中的应用
<i>Nostoc muscorum</i>	Smernoff D T	1988	封闭系统中微藻在污水处理等方面应用
<i>Synechococcus 6311</i>	Fry I V	1988	空间的生物节律研究
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Dubertret G	1987	辐射生物学效应研究
<i>Oecogonium cardiacum</i>			藻类空间生物学效应研究
<i>Chlorella vulgaris</i>	Popova A F	1979, 1983, 1986, 1992, 1996	
<i>Nitellopsis obtusa</i>	Leopold A C	1990 1993	重力生物学研究
<i>Anabaena oryza</i>	刘永定等	1995	空间生物学效应研究
<i>Dunaliella salina</i>	刘永定等	1995—1997	藻类空间适应和微重力刺激感受、 传导与反应研究
<i>Tolypothrix tenuis</i>	刘永定等	1987—1995	藻类在空间的适应与功能
<i>Porphyra yezoensis</i>			
<i>Mastigocladus</i> sp.			
<i>Haematococcus</i> sp.			
<i>Richelia sinica</i>			
<i>Botryococcus</i> sp.	刘永定等	1996	微藻“双向混合生长”的封闭系统研究
<i>Poterioochromonas</i>			
<i>Collodiotyon</i> sp.			
<i>Microcystis</i> sp.			
<i>Synechococcus</i> sp.			
<i>Cateria</i> sp.			
<i>Oscillatoria</i> sp.			

峭。由于细胞内贮藏多糖的减少，包围着蛋白核的淀粉外衣消失，类囊体内部空间膨胀，使得质体基质中出现电子透明区域。质体的膜系统发育不完全，且出现由 3—4 个类囊体组成的单束状结构。在一些质体的基质中，出现了沿着类囊体单束排列的由 50—190 nm 直径的小单囊泡排列的结构。但其蛋白核的结构在空间飞行藻与对照之间无明显差异。

小球藻细胞在空间环境中通过固体培养 30 天左右的电子显微分析则表明：飞行后的藻细胞亚显微结构出现大量的重排现象。质体膜系统变化主要表现在其基质中出现大量的 50—200 nm 直径的囊泡，它们的相对体积为总质体体积的 3.2%。在这些细胞中总的贮

藏多糖量大大减少, 有时甚至完全缺失, 总淀粉粒体积仅为质体总体积的 31.5% 左右 (仅为对照细胞的一半)。与此同时, 飞行后的藻细胞质体常常形成一种赘疣, 并且这些赘疣常和细胞膜连在一起。空间飞行的藻细胞蛋白核超微结构与对照没有大的区别。在固体培养基中空间培养的藻类, 线粒体的大小也没有明显的变化, 只是稍有加长, 线粒体基质的电子密度高于对照。线粒体的相对体积为 4.5%。在脂质体的数目和大小方面, 在固体培养基与在半液体培养基中长期空间飞行 (28 天) 的藻细胞是一致的, 其脂质体的相对体积是 12.1%。空间飞行藻细胞的液泡化程度轻微增加 (相对体积为 6.5%)。细胞膜折叠数目增加并具有更加复杂的构型。周质空间常常不规则地膨胀, 且有一些小的颗粒状物质。

通过比较固体琼脂培养基与液体及半液体状态培养基在空间培养小球藻的情况 (30 天) 发现, 小球藻细胞的亚显微结构是基本相同的<sup>[17,36,41]</sup>, 质体贮藏多糖减少; 在膜系统变化方面, 线粒体的嵴及细胞中脂质体的相对体积增加; 同时线粒体基质的电子密度增加, 细胞液泡化增加。另外, 前面所说的质体超微特征的变化仅仅在固体培养的小球藻细胞中出现。

空间飞行导致的小球藻细胞器超微结构的变化, Popova 等已经在地面回转器实验中部分地得到了证实。与细胞质体内贮藏多糖缺失相关联的淀粉酶多分子形式 (Multiple molecular forms) 的专一活性在经回转器处理的藻细胞中有明显提高<sup>[34]</sup>。飞行中不同培养状态下观察到的细胞形态结构方面的变化并不具备专一性, 这一点被证明是藻细胞在多种极端胁迫下的一种普遍的适应性变化<sup>[37]</sup>。线粒体所发生的相对体积、基质密度及嵴方面的变化可能是作为非专一性的, 但独立于培养方式的变化。通过对在 Bion-10 和 Bion-9 上的多复合水生系统经过 13 天空间飞行后的小球藻细胞超微结构变化<sup>[34]</sup>与 Mir 轨道站上 30 天固体培养小球藻的实验结果<sup>[42]</sup>进行比较分析, 发现藻类大多数超微结构的空效应是与培养基质类别无关的, 培养基质仅仅在很小程度上影响到藻类超微结构的空效应。

刘永定等<sup>[1]</sup>在小球藻与鱼腥藻的空间搭载实验中发现: 蛋白核小球藻淀粉粒数目明显减少, 而鱼腥藻经空间搭载后其脂质体也有明显减少的现象。我们在对具有高固氮酶活性的空间返地变异株的分析中还发现藻细胞的脂质体、羧体等细胞结构的变化。

**细胞核** Popova 等<sup>[35]</sup>在小球藻空间飞行实验中发现: 在空间飞行突变株中, 大多数细胞的细胞核超微结构与地面对照相似, 但在 7% 左右的藻细胞中发现浓缩染色质增加的细胞核, 这些浓缩染色质主要定位在细胞核的周边结构中。我们在稻田鱼腥藻返地单克隆株超微结构分析中也发现藻细胞浓缩染色质体积增加的现象。Halstead 等<sup>[13]</sup>在大豆及拟南芥根细胞的研究中也发现核的分布在空间飞行细胞中出现异常现象, 且浓缩染色质明显增加, 该现象与细胞有丝分裂减少相关联。同时, 在微重力环境中生长的细胞染色体畸变明显增加, 细胞核仁数目减少, 但微重力对细胞核的定位是没有影响的<sup>[46]</sup>。

### 2.3 生理生化特性变化

**藻类细胞生长** 藻类在研究微重力条件下低等植物的生长和再生中起着很重要的作用。小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 作为藻-菌-鱼系统中的一元在 Cosmos-1887<sup>[21]</sup> 中用来固定鱼产生的 CO<sub>2</sub> 且提供 O<sub>2</sub>。结果表明: 在整个飞行过程中, 小球藻能很好地翻天覆地,

并在空间生长数代。在诸多方面(如生长、繁殖及生活力等),生长在空间的藻类与地面的相似,只是在细胞的大小有些不同;而在返地后的生长中,没有发现差异<sup>[21,40]</sup>。Gavrliova等<sup>[11]</sup>在Cosmos-2044中用固体培养基培养的衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)的空间生长样品与地面对照比较有更多的细胞处于活性生长期,并且发现空间飞行细胞较地面的大。

刘永定等<sup>[1]</sup>将空间搭载后的小球藻和稻田鱼腥藻返地后分别涂平板,发现搭载藻在平板中长出的藻落数远远少于地面对照,在随后的单克隆分离中,也发现有的藻细胞出现性状分离,而有的则保持原有性状。说明生物体甚至每个细胞在空间生长的微环境可能并不完全一样,或者细胞个体对环境的反应并不完全一样。正如Popova等<sup>[35]</sup>利用不同的方式空间培养小球藻及我们进行的固体Agar、固相化及液体3种培养方式对小单歧藻(*Tolypothrix tenuis*)的空间生长情况进行的研究中所看到的,空间大环境及每个藻细胞所处的小环境都有可能对藻细胞的空间生长产生程度不同的影响。

**碳代谢** 从前面说到的小球藻细胞质体在空间环境中的超微结构重排现象可以看出,空间环境对藻类细胞的光合作用及与其有关的碳代谢的影响是很大的。刘永定等<sup>[1]</sup>在对空间飞行后返地的3种藻进行光合放氧及呼吸耗氧速率测定时,发现2个指标均有下降,但其机理不很清楚。而在研究小球藻的单克隆株中发现,经空间搭载后有的藻细胞克隆株光合活性与地面对照没有变化,而有的则下降很明显。

在与光合作用直接相关的色素系统变化研究方面,Meleshko等<sup>[23]</sup>进行了一系列的研究。这些研究的条件既有异养(黑暗),也有自养(光照)。在自养条件下,藻通过光合作用固定CO<sub>2</sub>并放出O<sub>2</sub>供鱼和微生物利用。实验在空间和地面同时进行,在飞行时,无论是光照还是黑暗,小球藻细胞的色素水平低于地面对照,约为地面对照的54%—63%;叶绿素a和b在数量上均有下降,但比率不变。飞行藻细胞总的类胡萝卜素水平约为地面培养的66%。空间搭载的藻细胞返回实验室培养,其色素水平的恢复较地面对照慢1天左右。空间飞行只影响到色素的含量,对其结构没有影响。

在Cosmos-1887的藻-微生物-鱼系统中生长的小球藻细胞在空间飞行后表现出贮藏多糖的减少(包括淀粉粒的大小和数目),淀粉酶活性增加近3倍,这种淀粉酶活性的增加导致单糖和二糖数目的增加<sup>[34]</sup>。在回转器及空间微重力实验中还发现:淀粉合成酶和ADP-葡萄糖焦磷酸酶活性减少37%<sup>[5]</sup>。

Nedukha等<sup>[26]</sup>提出一个观点,认为在空间微重力及回转器实验中,多糖组成成份的变化、初生壁物质合成的阻断以及次生物质水解酶的激活等细胞结构代谢的变化是通过细胞质膜结构和功能的变化以及质体代谢变化来介导的。首先,Siegel等<sup>[39]</sup>对多糖代谢变化的研究表明,在经过21天的回转器运转之后,万寿菊(Marigold)茎细胞壁纤维素、果胶和木质素的含量减少。Cowles<sup>[7]</sup>在高等植物幼苗中发现了多糖含量在短期(8天)和长期影响(24天)微重力影响下发生显著的变化。值得注意的,是1992年在不同的实验室已经报道了微重力对纤维素成晶作用的影响<sup>[6]</sup>。Nedukha等<sup>[24]</sup>也观察到在回转器中葫芦藓细胞结晶形式的纤维素含量减少,这种变化可能是与尿苷二磷酸葡萄糖利用的减少以及在纤维素分子间共价键与氢键减弱相联系的。

关于初生壁的合成,目前在藻类方面的研究较少,但在植物材料中进行了较多的研

究. 在马铃薯原生质体再生实验中发现, 通过回转器培养后, 其原生质再生速率减慢<sup>[25]</sup>, 并且在空间飞行实验中也发现在原生质体纤维素中<sup>14</sup>C糖的含量较地面对照少14%<sup>[12]</sup>, 然而果胶和纤维素水平仍维持在较高的水平, 这表明微重力影响了参加纤维素合成的细胞质膜的特性, 而质膜特性变化的更直接证据是微重力引起质膜ATPase活性及脂肪酸含量的变化<sup>[16]</sup>.

在许多研究中都发现次生壁水解酶活性的激活. 葫芦藓细胞在回转器中生长一段后, 其果胶化酶和纤维素酶活性有显著提高<sup>[24]</sup>. 由于半乳糖多聚酶及果胶甲酯酶甲氧基的降解过程与Ca<sup>2+</sup>释放是相随的, 表明藻细胞经空间飞行后细胞壁明显变薄, 胶质鞘减少均与这些酶的激活有直接关系.

**氮代谢** 藻类特别是具有异形胞的固氮蓝藻在空间飞行后氮代谢发生明显变化. Fry等<sup>[10]</sup>将几种具有固氮能力的蓝藻应用到CELSS研究中, 发现通过盐胁迫、温度胁迫及生长抑制剂等能控制藻的蛋白质与碳水化物的比例, 更具体地说, 胁迫对藻的蛋白质与碳水化物的比例是通过影响藻固氮酶活性来调节的. 同样, 空间环境因素也会对其氮代谢的途径与活性产生影响. 刘永定等通过卫星搭载后, 分离出高固氮酶活性的变异株. 胡章立等<sup>[2]</sup>在对高固氮酶活性克隆株进行回复搭载后, 出现了固氮酶活性高与低的性状分离, 且发现其变异株固定的氮在蓝藻体内除用于正常生长代谢外, 以藻胆蛋白的形式贮存和以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的形式外排. 我们在稻田鱼腥藻回转器的实验中也发现微重力刺激对藻细胞内藻胆蛋白累积, 以及NH<sub>4</sub><sup>+</sup>分泌的影响. 在对AoSR16(一个空间返地高固氮酶活性变异株)回复搭载后的单克隆分离中, 发现4个藻株完全失去固氮能力, 说明空间对蓝藻固氮酶的影响是不定向的. Nelson等<sup>[29]</sup>在对微生物进行改变重力的研究中发现, 通过离心或微重力处理之后, 生物体会出现一种抵抗胁迫的蛋白质——热激蛋白.

**与细胞膜系统有关的代谢活动** 空间飞行及地面回转器实验结果均表明, 空间环境因素会引起与膜系统相关的代谢活动发生变化. Palladina等<sup>[30]</sup>报道了在回转器实验中细胞膜的蛋白含量显著减少. Zhadko等<sup>[48]</sup>通过实验指出植物细胞在水平回转器实验中的第一反应就是膜脂的脂质过氧化. 类似的变化在小球藻细胞以及小麦幼苗的空间飞行中均有发现<sup>[3,49]</sup>. Polulyakh等<sup>[32]</sup>将生长到5—6天的大豆幼苗放入回转器中(转速为2r/min)24—48h, 发现细胞膜中磷脂酸和磷脂酰肌醇含量减少, 而磷脂酰胆碱和磷脂酰醇胺则先增加然后减少. C<sub>14:1</sub>、C<sub>18:0</sub>、C<sub>18:2</sub>、C<sub>18:3</sub>以及细胞膜脂的不饱和脂肪酸指数在2天的实验后明显增加, 而C<sub>14:0</sub>、C<sub>16:0</sub>、C<sub>18:1</sub>则减少. 另一方面, 脂肪酸的变化范围比磷脂宽. 回转器实验中细胞膜化学组成的变化是与膜的微粘度(Microviscosity)变化相关的<sup>[32]</sup>. 这种变化增加了膜脂质层分子之间的距离, 提高了膜的流动性和透性. 这种膜组成的变化在许多空间飞行实验中也得到了证实, 如Zhadko等<sup>[49]</sup>在生物卫星以及轨道站上利用空间飞行导致的膜结构代谢方面的变化, 使细胞间的融合效率大大提高, 因此, 已在许多生物材料中进行了空间细胞融合研究<sup>[14,22,38]</sup>.

在空间引起的膜代谢变化中离子及离子通道的作用非常大. Tairbekov等<sup>[45]</sup>报道, 在玉米的变重力实验中, 实验组细胞与对照组细胞之间ATPase活性有差异. 当重力增加至2g时, ATPase活性增加50%. 增加重力会引起ATP的分解, 而ATP的合成与分解会导致细胞器结构上的变化, 这在对照和回转器实验中没有观察到. Tairbekov等<sup>[45]</sup>还

报道在回转器培养的细胞 ATP 水平仅为对照的 63%, ATP 水平降低与呼吸速率升高相关联。

与质膜结合的 ATPase 活性的变化已有许多报道。我们在经回转器运转 4—6 天的盐生杜氏藻细胞中分离出的膜制剂可以看出, PM  $H^+$ -ATPase 活性较对照增高。Palladina 等<sup>[30]</sup>以在回转器中经过 5 天生长的大豆幼苗分离的质膜制剂分析,  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性下降而  $K^+$  刺激  $Mg^{2+}$  影响的 ATPase( $H^+$ -ATPase) 活性升高。通过电子细胞化学分析方法发现, 在对照细胞中的  $Mg^{2+}$ -ATPase 的反应沉淀物大多定位在质膜、胞间连丝、核染色质、内质网及高尔基体等; 而  $Ca^{2+}$ -ATPase 则定位在平衡器细胞的质膜上; 经过回转器运行之后,  $Mg^{2+}$ -ATPase 反应沉淀物在质膜上呈大束状分布, 仅有少量的沉淀物分布于高尔基体、质体内膜系统、核膜、染色质及核等<sup>[16,30]</sup>, 而在平衡器质膜上的  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性减少<sup>[31]</sup>。Belyavskaya 等<sup>[4]</sup>则报道在回转器中生长的生物材料没有检测到  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性。

**$Ca^{2+}$  浓度与代谢特性及配子结合行为** Kordyun 等<sup>[18]</sup>在对小球藻空间飞行后的淀粉酶及细胞壁酶复合体活性变化研究中指出: 细胞内合成与水解酶活性的变化可能与细胞质中游离  $Ca^{2+}$  浓度相关联, 在微重力下细胞质  $Ca^{2+}$  浓度增加。  $Ca^{2+}$  参与了  $\alpha$ -淀粉酶及  $\beta$ -1,3 葡聚糖合成酶活性的调节作用<sup>[15]</sup>。在回转器实验中, 细胞液中  $Ca^{2+}$  与细胞质膜接合位点的变化在小球藻、豌豆及拟南芥中都有报道。通过原子吸收光谱方法测得  $Ca^{2+}$  在小球藻实验组细胞中有减少的趋势。这与在回转器实验中报道的  $Ca^{2+}$ -ATPase 活性下降是一致的。可见, 在微重力及回转器实验中, 细胞体内  $Ca^{2+}$  的平衡是变化的<sup>[28,42]</sup>。

单细胞绿藻——衣藻 (*Chlamydomonas*) 被置于 MASER-3 探空火箭上用以研究重力对藻细胞相互作用及“性接合”的影响。这种藻产生两种类型的鞭毛配子, 即“+”和“-”的配子。这些配子的每一根鞭毛粘性加强以及鞭毛的顶端相互接触。通过这些过程后, 成对的融合细胞形成。在空间飞行实验中, “+”和“-”的配子在微重力环境中 7 min 可以配对, 所有的“接合”步骤在空间比在地面进展得慢<sup>[8]</sup>。已观察到在微重力下其鞭毛粘性下降。实验表明整个卫星发射过程中的加速、振动以及空间因素的协同作用均可能影响配子“接合”过程。为了开展进一步的研究, 人们强调在空间飞行中设置 1g 参照离心机是非常必要的<sup>[9]</sup>, 我们亦向此方面努力。

#### 2.4 染色体及遗传基因水平的变化

空间飞行是否会导致藻类细胞产生在染色体及遗传基因水平的变化? 目前, 国内外对此报道很少。我们给出了部分返地性状分离藻株的研究结果。胡章立等<sup>[2]</sup>对稻田鱼腥藻空间返地的高固氮酶活性克隆株 (AoSR16) 在地面进行了近 2 年的保持培养后检测, 仍具有高固氮酶活性。对其回复搭载后再分离的单克隆株 AoSR16—17 进行遗传学分析, 找到了 AoSR16—17 与原始野生株之间的遗传物质的差异。对这些差异的分析还在进行, 但可以肯定空间环境导致稻田鱼腥藻出现基因水平上的差异。Levine 等<sup>[20]</sup>在部分植物细胞中发现空间飞行减少了细胞分裂次数, 提高了染色体损伤的几率, 而地面对照则没有发现染色体损伤的现象。这与对生长在 STS-2 和 STS-3, 以及 Spacelab-2 上的燕麦和向日葵的分析结果一致<sup>[19]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] 刘永定等. 返地卫星搭载对鱼腥藻和小球藻的影响. 科学通报, 1993, **38**(2):177—180
- [2] 胡章立等. 稻田鱼腥藻返地克隆株的卫星再搭载研究. 科学通报, 1995, **40**(18):1707—1710
- [3] Barabol V A *et al.* Lipid peroxidation in plants of different organization levels under microgravity stress. *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Biol.*, 1991, **3**:368—375
- [4] Belyavskaya N A, Kordyum E L, Podlutsky A G. Peculiarities of the localization of calcium ATPase in pea root cells under clinostatic rotation. *Tsitologiya*, 1988, **30**:84—87
- [5] Brown C S, Piastuch W C, Knott W M. Soybean cotyledon starch metabolism is sensitive to altered gravity conditions. In: Abstract World Space Congress. Washington, 1992. 526
- [6] Brown C S *et al.* Gravity effects on cellulose assembly. *Amer. J. Bot.*, 1992, **79**:1247—1258
- [7] Cowles G J *et al.* Growth and lignification in seedlings exposed to eight days of microgravity. *Ann. Bot.*, 1984, **54**(Supp.3):33—48
- [8] Demets R *et al.* Unicellular algae in space—II. Sounding-rocket experiment. In: Proc. 4th Euro. Symp. Life Sci. Res. Space. ESA SP-307. Paris:European Space Agency, 1990. 339—346
- [9] Demets R *et al.* Unicellular algae in space—III. Addendum. In: Proc. 4th Euro. Symp. Life Sci. Res. Space. ESA SP-307. Paris:European Space Agency, 1990. 347—354
- [10] Fry I V *et al.* Application of photosynthetic N<sub>2</sub>-fixing cyanobacteria to the CELSS program. N88-12257. The Reference Bank of Space Biology, 1988
- [11] Gavrilova O V, Gabova A V. Experiment “*Chlamydomonas*” aboard biosatellite “Cosmos-2044”. *Physiologist* 35, 1992, **1**(Supp.):212
- [12] Gorshkova T, Zabolina O, Lozovaya B. Regeneration of cell wall by isolated proplasts, these of 3 Vsesoyuznoyi Konfer. In: Cellulose-90. Kazan, 1990. 41
- [13] Halstead T W, Dutcher F R. Plant in space. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1987, **38**:317—345
- [14] Hampp R, Naton B, Hoffmann E. Suspensions of plant cells in microgravity. *Microgravity Sci. Tech.*, 1990, **3**:168—172
- [15] Hayashi T, Read S M, Bussel J. UDP-Glucose (1-3)- $\beta$ -glucan syntheses from mung bean and cotton. *Plant Physiol.*, 1987, **83**(3):1054—1062
- [16] Kordyum E L *et al.* The role of calcium ions in cytological effects of hypogravity. *Adv. Space Res.*, 1984, **4**(12):23—26
- [17] Kordyum E L *et al.* Cell ultrastructure of the *Chlorella vulgaris* (strain LARC-1) frowning for five days in space flight conditions. *Rep. Ukr. Ac. Sci.*, 1979, **6B**:476—479
- [18] Kordyum E L *et al.* Effect of altered gravity on plant cell processes—result space and clinostatic experiments. *Adv. Space Res.*, 1994, **14**(8):77—85
- [19] Krikorian A D *et al.* Effect of space flight on growth and cell division in higher plants. *Adv. Space Bio. Med.*, 1992, **2**:181
- [20] Levine H G *et al.* Results from the chromosomes and plant cell division in space experiment flown aboard shuttle mission STS-29. *ASGSB Bull.*, 1992, **4**(1):78
- [21] Levinskikh M A, Sychev V N. Growth and development of unicellular algae under space flight conditions with in ecosystem of “algobacterial cenosis-fish”. *Kosm. Biol. Aviakosm. Medit.*, 1989, **23**(5):32
- [22] Mehrle W *et al.* Effects of microgravitation on electrofusion of plant cell protoplasts. *Plant Physiol.*, 1989, **89**:1172—1177
- [23] Meleshko A A *et al.* The effect of space flight factors on the pigment system of one-celled algae. *Kosm. Biol. Aviakosm. Medit.*, 1990, **24**:462
- [24] Nedukha E M. The role of cellulases in the *Funaria hygrometrica* moss protonema at clinostating. *Adv. Space Res.*, 1992, **12**:99—102
- [25] Nedukha E, Sidorov V, Samoylov V. Clinostation in fluce on regeneration of cell wall in *Solanum tuberosum* L. protoplasts. *Adv. Space Res.*, 1994, **14**(8):97—108



- [26] Nedukha E M. Possible mechanisms of plant cell wall changes at microgravity. *Adv. Space Res.*, 1996, **17**(6/7):37—45
- [27] Nedukha E M, Trutneva I A. Role of pectinases in mechanism of moss protonema cell walls at clinostation. *Dokl. Akad. Sci. Ukr.*, 1988, **7B**:71—74
- [28] Nedukha E M. Effects of clinostat treatment on the distribution of calcium ions in cells of *Funaria hygrometrica*(Hedw.) protonema. *Dokl. Akad. Nauk Ukr. SSSR*, 1989, **4B**:71—73
- [29] Nelson G. Report of the microbial development working group. Virginia:NASA Developmental Biology Workshop Arlington, 1984. 83—89
- [30] Palladina T O, Kordyum E L, Bilyavs'Ka N O. Activity and localization of transport ATPase in cells of pea seedling roots during hypogravitation. *Ukr. Bot. Zh.*, 1984, **41**:54—57
- [31] Podlusky A G. Cytochemical localization of calcium ATPase in pea roots under normal conditions and clinostating. *Ukr. Bot. Zh.*, 1986, **43**:82—84
- [32] Polulyakh Y A, Volovik Z N. Fluorescence analysis of microviscosity of plant cells under scalarization conditions of the gravitation vector. *Dokl. Akad. Nauk Ukr. SSSR*, 1989, **12B**:61—63
- [33] Popova A F, Kordyum E L, Sytnik K M. Submicroscopic organization *Chlorella* cells in polycomponent system in conditions of space flight. *Rep. Ukr. Ac. Sci.*, 1989, **8B**:70—73
- [34] Popova A F, Shnyukova E I. The ultrastructure of chloroplasts, peculiarities of the fractional composition and specific activity of amylases of *Chlorella* cells under microgravity. *Rep. Ukr. Ac. Sci.*, 1988, **7B**:75—78
- [35] Popova A F, Sytnik K M. Peculiarities of ultrastructure of *Chlorella* cells growing aboard the BIO-10 during 12 days. *Adv. Space Res.*, 1996, **17** (6/7):99—102
- [36] Popova A R *et al.* Ultrastructural and growth indices of *Chlorella* culture in multicomponent aquatic system under space flight conditions. *Adv. Space Res.*, 1989, **9**(11):79—82
- [37] Raskin L, Kende H. Effect of submergence on translocation starch content and amylolytic activity in deepwater rice. *Planta*, 1984, **162**(116):556—559
- [38] Schnettler R *et al.* Increased efficiency of mammalian somatic cell hybrid production under microgravity contions during ballistic rocket flight. *Appl. Micrograv. Tech.*, 1989, **2**:3—9
- [39] Siegel S M. Gravity as a biochemical determinant. *Life Sci. Space Res.*, 1978, **17**:147—160
- [40] Sychev V N, Levinskikh M A, Livanskaya O G. Study of the growth and development of *Chlorella* flown on the biosatellite "Kosmos-1887". *Kosm. Bio. Aviakosm. Medit.*, 1989, **23**(5):35
- [41] Sytnik K M *et al.* Ultrastructure of *Chlorella pyrenoidosa* (strain g-II-I) cells, growing at the long-time space flight conditions. *Ukr. Bot. J.*, 1979, **4**:311—315
- [42] Sytnik K M *et al.* Peculiarities of the submicroscopic organization of *Chlorella* cells cultivated on a solid medium in microgravity. *Adv. Space Res.*, 1992, **12**(1):41—46
- [43] Sytnik K M *et al.* Plant Cell Under Geophysic Factors. 1984
- [44] Tairbekov M *et al.* Content of lipid fatty acids of plant mitochondria, cultured in altered gravity conditions. *Dokl. Akad. Nauk Ukr. SSSR*, 1979, **246**(5):1253—1255
- [45] Tairbekov M G, Kabitskii E N, Mailyan E S. ATPase activity in root cells of corn grown under altered gravitational conditions. *Fiziol. Rast.*, 1980, **27**:883—885
- [46] Volkman D, Sievers A. Gravitational effects on subcellular structure of plant cell. *Life Sci. Space*, 1990, **11**:497—501
- [47] Yarlikova Y V, Ivanova S M. State of erythrocyte membrane in man and monkeys after space flight. *Adv. Space Res.*, 1996, **17**(6/7):179—182
- [48] Zhadko S I *et al.* Intial responses of pea seedlings to clinostating. *Dokl. Akad. Nauk Ukr. SSSR*, 1988, **8B**:66—68
- [49] Zhadko S I *et al.* Lipid peroxidation of plants under microgravity and its simulation. *Adv. Space Res.*, 1994, **14**(8):103—106

# BIOLOGICAL RESPONSES OF ALGAE TO SPACE ENVIRONMENT

HU Zhangli      LIU Yongding

*(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)*

## Abstract

Researches on biological responses of algae to space environment has entered into a new period from finding the responses to exploring the molecular mechanism. Main results in past years on different levels of population, community, individuals, tissue and molecule were reviewed.

**Key words**    Algae, Space environment, Biological responses, Clinostation