

21 世纪空间生命科学和空间生物技术的发展机遇与挑战 Opportunities and Challenges of Development of Space Life in the 21st Century

刘承宪

(中国科学院上海植物生理研究所 上海 200032)

人类为了自身的生存和繁荣,总是在不断地开拓生存空间。从生物进化观点来看,人类最终是要走出地球的。尽管空间科学一开始并不是以人类移住地外星球为出发点,但随着空间科学的发展,必然会给空间生命科学带来新的发展机遇与挑战。

自 1957 年前苏联第一颗人造卫星上天、揭开人类跨越天疆开拓生存空间的序幕以来,空间科学发展大体上可以分为 3 个阶段:第一阶段是发展空地往返技术,这一阶段的标志是航天飞机;第二阶段是永久占领近地轨道空间,这一阶段的标志是建立空间站;第三阶段将是开发深层空间和进行有限的空间移民,这一阶段的标志是增强人在空间的自主能力,建立受控生态生命支持系统(CELSS)。

正当空间科学跨越“方便的空地往返”阶梯、朝着永久地占领近地轨道空间——建立自由号空间站迈进的时候,空间生命科学也相应地走完了“钓鱼试验”的时代历程,迎来有计划和有目的开发利用近地轨道空间资源的新时代。摆在我们面前的主要任务有:(1)从细胞水平上阐明重力的生物学问题;(2)发展空间生物技术以实现空间生物加工;(3)加强空间医学和生理学问题的研究;(4)开展 CELSS 的基本生物学问题的研究。下面就 21 世纪以上 4 个方面问题的发展机遇与挑战作一介绍。

一、从细胞水平上阐明重力的生物学问题

重力的生物学问题由来已久,早在达尔文时代就为人们所重视。由于地面重力无处不在,人们只能利用超重力(离心机)进行研究。实验证明,生物体感重器官从感受重力刺激到产生可检测的反应,有一定的时间,即所谓阈时要求。阈时事实上包括重力刺激作用时间和重力刺激后生物体产生生长反应所需的时间,其长短视重力大小而定。对一定的生物种来说阈时长短和重力大小的乘积是个常数,这就是所谓的刺激量法则: $f(\text{重力}) \cdot t_p(\text{阈时}) = \text{常数}$ 。

按照这个法则,重力大小和阈时长短互为倒数,所以刺激量法则又叫反比法则。由于地球重力($1g$)是个常数,所以植物的重力敏感性通常用阈时表示。重力作用的生理学过程,除了 20 世纪 30 年代有过一些假说,如平衡石假说和生长素假说外,直

到 60 年代重力信号在生物体内的感受、转导、传递和反应的分子过程仍鲜为人知。

空间飞行实验表明,在距离地表 223.3~833.4 公里的近地轨道空间,重力有可能像温度、光照和溶质浓度一样,作为一个变数加以研究^[1],预示人类有了一个解决重力在生物进化过程中作用问题的理想境地。另一方面,也由于空间开发的需要,需要解决适应地球重力环境进化而来的生物如何适应空间不同重力环境的问题。为此,美国专门成立了“重力和空间生物学学会”(ASGSB)。NASA 曾先后邀请欧美各国知名的生理学家和重力植物生理学家就重力的生物学问题进行专题研讨。例如,1984 年在弗吉尼亚召开“植物重力和空间”的专题研讨会,就利用空间微重力资源解决重力植物生理学问题制定长期规划,会议指出今后一段时间内,空间植物生理学的研究重点:(1)阐明重力感受、转导和传递机制;(2)评估重力在决定植物整个生命周期各个发育阶段中的作用;(3)查明在没有重力作用的情况下,植物体对其他环境参数如光、机械刺激和磁场的反应,过去这方面的知识,都是在有地球重力作用掩盖下取得的。

经过近 40 年的努力,重力生物学问题的研究取得了重大进展,不仅发现重力在整体水平上通过感重器官影响生物体的生物学过程,而且还在细胞水平上找到新的线索。一个典型的例子,是人体淋巴细胞在空间微重力环境中,对伴刀豆球蛋白 A 引起的增生活性比地面减少 90%。

1991 年 COSPAR 会议指出,几个主要研究课题 20 多年来的实验结果基本确定,单个细胞对重力环境的改变是敏感的。在空间微重力环境中,细胞代谢、细胞分化和细胞形态学上的重大变化被发现以后,现在到了应当用现代细胞机器(cellular machinery)知识修正我们对重力生物效应认识的时候了。

重力影响细胞可能有 3 个途径:(1)通过分子或起重力传感器作用的细胞器起作用;(2)通过细胞周围物理化学变化引起的适应性反应;(3)通过整体作用途径起作用。现在倾向认为,是通过整体作用途径。所谓整体作用,是指细胞水平上重力的直接或间接的影响。直接影响,指重力影响通过细胞内重力传感器(sensor)显示出来,和平衡石假说相当。间接效应是指重力通过改变胞外环境,像对流、细胞—细胞接触或细胞—底物粘合对细胞产生的

影响,在这种情况下不需要重力传感器。

为了说明重力在细胞水平上的整体作用,一个全新的假说——双叉理论(Bifurcation Theory)已经问世^[2]。按照这个理论,在微重力条件下细胞类似一个非线性热力学不平衡系统,酶催化的及复杂的反馈机制控制的生物化学反应和正常重力条件下完全不同。每种细胞都要有一定的阈重力,才能打开系统从微重力转换到正常重力下行为的开关。这个开关就是双叉理论的叉点,又叫重力敏感窗,各国都在积极组织力量进行验证。ESA为了验证细胞的重力敏感窗问题推出自落机,NASA约翰逊空间中心推出的“以微重力为基础的生物反应器”,又叫转壁管反应器,可用于地面模拟研究重力在细胞水平上的整体效应。

一般认为,在重力直接作用下细胞内传感器位移产生的位能很小,不足以引起生物大分子相互作用,必须有一专门的放大机制将重力信号放大到随机热能水平以上。这种放大机制,有点类似光聚焦,通过一个小的空间累积同类信号进行。细胞水平上聚焦放大有两种可能途径。一是通过细胞骨架的杠杆作用进行放大。例如,一个相对密度为 $0.2\text{g}/\text{cm}^3$ 和直径为 $7.5\mu\text{m}$ 的球形核只要移动 $0.5\mu\text{m}$ 就能产生 $40\text{卡}/\text{mol}$ 能量,集中在质膜内几个分子上,给每个大分子提供一个能量约比随机热能大60倍的信号。任何细胞,只要其骨架有必要的动力学性质和重力矢量方向在一定时间(阈时)内是恒定的,都可以实现这种放大;另一种聚焦放大是通过细胞网络,在这种情况下细胞微管处在ATPase介导的连续振动状态,对网络中颗粒空间分布十分敏感。重力矢量改变可能引起不同的振动型式,将重力信号能量集中在细胞一定区段。这种分子马达推动的细胞骨架振动可以解释在chara假根及A431表皮样癌细胞中观察到的微丝组织对微重力的迅速反应。

经过聚焦放大集中起来的能量,可克服网络蛋白局部聚合阈,打开或关闭膜内离子通道导致另一类型放大,一种涉及平移步骤的非线性平移放大。这种放大实际上是一种耗能的、受体介导的信号转导,释放出低能结合的信使,触发需要消耗较高能量的生物学过程。有证据表明,信号转导成信使是一种以 Ca^{++} 为第二信使的双信使系统,经过传递再引起生长反应。

应当指出,双叉理论目前还只是一种假说,在高等植物的感重细胞中已获得较多的资料支持,但在细菌、酵母和动物细胞中尚未取得有用的资料。很多空间飞行实验结果,也无法用这一理论进行解释。例如,在微重力条件下培养细菌、藻、植物和原生动物,大多数生长速度和生产量比1-G培养物增加。相反,用丝裂原诱导淋巴细胞的增殖作用在微重力条件下却减少。如果说这两类细胞有什么不同,那就是淋巴细胞增殖是在细胞分化的情况下,而细菌和其他真核细胞的增殖没有细胞分化。

值得指出,空间生物学与空间生物技术的每一项进步对地面生物学研究都有着很大的推进作用。例如,约翰逊空间中心推出的微重力生物反应器,可以在一个较大的应力范围内($0.2\sim 0.92\text{dyn}/\text{cm}^2$)对重力的直接对间接作用进行模拟研究,地面培养肠癌、小肠和软骨细胞可以进行三维生长,形

成直径达 0.5cm 的细胞聚合体^[3]。于是“组织工程学”应运而生,人们寄希望利用这台装置发展同源移植技术。

二、空间生物技术和空间生物加工问题

除了重力的生物学问题外,空间生物加工是开发利用空间微重力资源的另一重要方面。

1. 生物大分子晶体生长技术

大家知道,大分子结晶学是研究生物大分子结构与功能的有力工具,受到制药工业、化学工业和生物技术工业的青睐和支持,特别是用于以结构为基础的药物设计和蛋白质工程。一个适当大小和高质量的晶体,是测定蛋白质和核酸三维结构的先决条件。根据空间材料科学的经验,在空间微重力环境中没有重力沉降,蛋白晶体可以在接近各向同性的条件下生长,晶体大小和形状都会得到改进;没有密度差引起的对流,蛋白质晶体在接近扩散限制晶体生长的条件下生长,可能会改进晶序和提高X-射线衍射分辨率。

早期采用蒸汽扩散装置的飞行实验获得成功,随后一种以蛋白质微重力结晶装置为基础的通用设备PCAM^[4]得到了发展。1995年和1997年美国航天飞机飞行实验获得10多种高质量蛋白质晶体中,EF手型蛋白质晶体的X-射线衍射分辨率高达 $0.9\text{\AA}$,而且能够进行中子衍射研究。各种新的结晶技术,如液-液扩散和温度诱导的分批结晶技术相继引入飞行实验,获得一次比一次更大的成功,但也出现同一种蛋白质在微重力下采用不同结晶技术长晶时长出的晶体不完全相同的问题,说明在空间微重力环境中不同蛋白质采用何种结晶技术长晶,有一个结晶技术优化问题。有鉴于此,美国空间研究局微重力委员会在其“90年代微重力研究机遇”白皮书中指出,这些问题可以延伸到各种蛋白质,如膜蛋白、受体-配基复合物、糖蛋白和其他大分子,需要更好地了解各种技术的限制。通过反复的微重力实验,了解它们之间的差异,以期在微重力条件下可以获得预期的结果。

此外,有无强对流的微重力溶菌酶结晶实验和数值模拟研究指出,蛋白质晶体质量取决于溶质运输与非线性界面动力学的相对权重,视谁控制晶体生长过程。因此,蛋白质晶体生长还有一个结晶条件优化问题^[5],所以NASA和日本开发事业团(NASDA)等国都把蛋白质晶体生长列为自由号空间站重要研究项目。

应当指出,最近美国一个评估NASA生命科学研究计划的生物学家专门小组建议结束空间蛋白质结晶实验,理由是没有获得预期结果。这显然是对蛋白质在空间微重力环境中结晶技术优化、晶体生长条件优化和潜在经济效益等问题估计不足。

2. 生物分离

近30年来生物技术的发展神速,很多专治疑难病症的内源性药物被揭示出来。但由于地球重力的影响,这些被揭示出来的内源性药物因所谓的生物技术下游问题无法工业化生产。所谓生物技术下游问题,主要是指由于重力沉降和热对流的影响,无法

进行细胞大规模悬浮培养和制备型生物分离。

1978年, NASA 提出空间制药计划, 在世界范围内引起强烈的反响。按照这项计划, 麦道宇航公司承担生物分离, 负责空间电泳处理; Houston 约翰逊空间中心和加州 Pasadena 喷气发动机推进实验室承担研制细胞大规模悬浮培养装置, 各负责研制一台自由号空间站上使用的细胞生物反应器。

1987年 NASA 又和美国商业部技术与标准研究所 (NTST) 在科罗拉多州 Boulder 就“生物活性物质加工和生产问题与挑战”进行了商讨, NIST 负责提出生物活性物质加工与生产的有关问题, NASA 负责提供低重力资源及用于研究和生物加工有关的依赖重力的流体力学问题。

MDAC 的生物分离工作因挑战者号航天飞机爆炸事件于 1988 年终止了它的 EOS 计划, 取消全部飞行实验, 但美国连续流电泳仪的研制工作也没有因此而中断, 在美国空间工业电泳计划的支持下, 由宾州大学细胞研究中心 (CCR) 负责继续进行研制。原定 1995~1996 年进行飞行实验, 后因计划变动有所推迟。其他生物分离技术, 如等电聚焦电泳和相分配分离技术仍在研究之中。

3. 空间细胞培养

飞行实验证明, 空间没有重力沉降, 哺乳动物细胞可以进行大规模和高密度悬浮培养。但是, 细胞悬浮培养生产内源性药物通常要分阶段, 即分生长培养阶段和条件培养阶段进行, 短时间培养很难达到预定目的。由之而来的问题是, 细胞培养期间的供氧和细胞周围的贫质区问题, 如果这两个问题不解决, 要在空间进行大规模和高密度细胞悬浮培养实际上是一句空话。

1978 年约翰逊空间中心成立了由各国科学家组成的研制小组, 开始研制第一台细胞生物反应器。该反应器容量为 200ml, 是按中空纤维和回转器原理设计的。原定 1991 年或 1992 年进行第一次飞行实验, 实际上到了 1993 年才公布它的地面实验结果, 即上面提到的微重力细胞生物反应器。从 1988 年 NASA 召开的空间站商业用户研讨会的讨论情况来看, 自由号空间站有可能用这台设备培养杂交瘤细胞生产单克隆抗体。

Pasadena 喷气发动机推进实验室负责研制的第二台生物反应器, 容量为 10~12 升, 是自由号空间站受控生态生命支持系统 (CELSS) 的部件, 主要用来培养酵母和类似生物为空间站提供食品。拿 Corradi 和 Gmuender 的话来说, 这是 NASA 为 21 世纪载人航天所作的一项伟大的技术挑战。

除了上述 2 台用于空间生物加工的细胞生物反应器尚未进行过飞行实验外, 已经进行过飞行实验的、主要用于研究空间细胞培养方式的生物反应器都比较小, 如 ESA 的 DCCS 系统和 Morrison 的灌注生物反应器。最近, 法国又推出通用细胞培养箱, 用于研究微重力下培养淋巴细胞和单核细胞问题。

4. 空间细胞电融合技术

细胞融合是一门实用性很强的生物技术。植物细胞可通过体细胞融合克服远缘杂交不孕性培育新品种, 动物细胞可通过产生特定抗体的 B 淋巴细胞和骨髓瘤细胞融合获得用于生产单克隆抗体的

杂交瘤细胞。

对植物细胞来说, 80 年代初, 细胞融合技术在培育作物新品种方面, 曾经有过一段辉煌, 在改善油料栽培作物向日葵的品质和产量方面作出了贡献, 后因技术上的问题趋向冷落。细胞融合技术的主要问题是杂种细胞筛选, 植物杂种细胞不能像微生物那样, 可通过选择性培养基, 如耐药性或营养突变型筛选, 否则会引起变异得不到所需要的杂种。近年来, 国外出现一种新的技术, 即利用植物细胞通常都有一个占细胞体积 90% 以上的液泡的特点, 将亲本细胞之一的液泡除去再行融合, 获得细胞密度介于两亲本细胞之间的杂种细胞, 通过简单的密度梯度离心就可将其与亲本细胞和同源杂种细胞分开。遗憾的是, 地面上由于地球重力的存在, 有/无液泡原生质体的密度差加大, 异源细胞融合得率十分有限。

对动物细胞来说, 细胞融合技术实际应用的主要问题是融合得率太低, 一般只有 10^{-4} ~ 10^{-5} 左右。尽管细胞融合得率是如此之低, 但只要有足够数量能产生特定抗体的 B 淋巴细胞, 如鼠源性 B 淋巴细胞, 还是有可能得到杂交瘤的。但是, 鼠源性单克隆抗体作为内源性药物用于人体, 虽有特殊的医疗价值, 却常因人体产生抗鼠源性单抗的抗-抗体, 引起过敏、肝脏和肾脏损伤等免疫性病理反应。因此, 世界各国都在设法研究制备人源性杂交瘤技术。可是制备人源性杂交瘤细胞又比制备鼠源性杂交瘤细胞多了一些难题, 其中主要难题之一是能产生特定抗体的 B 淋巴细胞来源有限。由于人道主义的原因, 不能像对待动物那样对人进行免疫, 只能从病人身上采样。据报道, 500ml 静脉血只能分离出 5×10^7 个 B 淋巴细胞, 其中能产生抗体的只有 5×10^6 个, 而能产生特定抗体的只有 5×10^3 ~ 5×10^4 个细胞。解决这一问题的主要出路有 2 条, 一是设法在体外用特定抗原活化人体 B 淋巴细胞, 解决产生特定抗体的 B 淋巴细胞来源问题; 二是提高细胞融合得率。按德国细胞电融合技术发明家 Zimmermann 估计, 细胞融合效率如能提高到 10^{-1} 到 10^{-2} 就有可能用来制备人源性杂交瘤。用特定抗原在体外活化人体 B 淋巴细胞的研究已取得很大进展; 但在地面上由于无法排除地球重力的影响, 要提高 B 淋巴细胞和骨髓瘤细胞的融合得率简直比登天还难。

80 年代中, Zimmermann 等人在空间材料科学的启发下, 试图利用空间微重力条件改进细胞融合技术。大量的飞行实验表明, 在微重力条件下酵母细胞杂种得率有很大的增加 (TEXUS 11/12)。有液泡和无液泡的烟草叶肉原生质体在微重力条件下融合, 不仅 1:1 杂种细胞得率大大增加, 而且按照原生质体光放氧能力测定结果来看, 在微重力下获得的杂种细胞更具有活力 (TEXUS 17)。哺乳动物细胞在微重力环境中融合得率增加 10 倍, 有活力的杂种细胞数也比地面对照增加 2 倍 (TEXUS 18)。融合得率增加显然是由于没有重力沉降影响的缘故, 杂种细胞活力增加可能是细胞排列时间缩短引起的。在取得这些成功实验的基础上, 进一步研究融合后的细胞在空间培养的可能性已经开始。获得的证据表明, 在微重力环境中原生质体再生及细胞分裂速度

和 1xg 对照明显相似,但只需要较少的能量^[6]。

1994 年约翰逊空间中心 Morrison 博士在总结过去工作的基础上,提出未来自由号空间站上工业规模生物加工流程。整个流程的 5 个分系统事实上是 4 套设备,即连续电泳仪、细胞电融合仪、细胞生物反应器和流式细胞仪。前 3 套设备都已经过飞行实验验证,流式细胞仪虽未上天但用于飞行实验的样机已研制成功。应当指出,未来的空间生物加工流程是否果如 Morrison 博士所料,还很难说,很可能一开始时只是一些单项加工,如蛋白质晶体生长、细胞培养、生物分离或细胞融合。

三、空间医学和生理学问题

随着空间开发工作的深入一步发展,人在空间逗留时间也愈来愈长。大量的飞行实验已经证明,人在空间可以生活 1 年以上没有性命之忧,但有不少问题却严重影响人在空间的工作和生活。在这些问题上,首要问题是感重器官,即前庭器官引起的空间运动病。它的出现不可预测,也不能地面模拟测定,常伴随严重不适症状,使宇航员无法工作。其次是心血管变化,宇航员在失重后头几小时内大约 2 000ml 体液(血浆和间液)由下身转移到上身,但不会引起严重不适。最后是肌肉萎缩和骨质降解,大量钙质从小便中排出。飞行中强烈的适应性训练,也不能完全防治。为了保证宇航员健康地工作和生活,除了常规的医学检查外,近年来开始通过组织培养方法从生理学角度研究上述疾病的发病机理,例如,用组织培养法研究空间微重力环境中神经原细胞的发育生理学,肌肉细胞的能量代谢和造骨细胞的骨质代谢。有证据表明,在空间环境中人和动物出现尿量增多和尿钠排出增多等电解质混乱现象,与下丘脑和脑垂体有关。下丘脑核团产生的精氨酸加压素和生长素释放激素减少,可能是导致肌肉萎缩的原因,也可能和肌肉细胞能量代谢途径改变有关。宇航员在空间体内大量钙质从小便中排出引起骨质酥松现象,可能是因造骨细胞钙的回吸作用受到阻抑。有迹象表明,可能是脑前庭系统在微重力下失去前庭传入,导致接受前庭支配的神经原,如 Mauthner 神经原受损,引起内分泌系统改变造成的。在微重力条件下细胞早反应基因,如 C-fos 基因表达增加,神经细胞发育迟缓,其发生机制尚不清楚,有证据表明,这种变化很可能是不可逆的,而且越小的胚胎影响越明显。鉴于神经系统在微重力环境下可改变人类的太空生活,随着空间生命科学的发展和实验手段的改进,这方面的研究将会更系统、更深入。

除上述病理学问题外,还有很多人有空间的适应性问题。例如,美国和俄国的宇航员,在飞行后通常都可以观察到红血球量减少 2~21% (RBC) 和血红蛋白量减少 12~33%。与之相伴,血浆体积减少 4~6%。血液中红血球和血红蛋白浓度保持稳定表明,这种变化是通过反馈机制控制的。免疫学变化,主要是 T-淋巴细胞反应性降低。Salyut-6 飞行 96 天和 140 天的结果表明,免疫系统对飞行的适应分两个阶段进行,第一阶段在空间头 2~3 个月期间发

生,接下来是第二阶段,免疫反应进一步削弱。应当指出,RBC 量减少和淋巴细胞反应性降低不损伤宇航员的健康。这种变化是一种生理性适应反应,而不是一种病理状态。但是,空间站的建立必将为更多的社会团体提供飞行机会,宇航员的挑选也不像以前那样严格,这些问题不解决,贫血病和感染的风险也就愈来愈大。

为加强这方面的研究,美国空间科学局专门成立了一个空间生物学和医学委员会(CSBM),1998 年公布了 21 世纪空间生物学和医学的研究战略^[7],生理学和植物生理学问题是其 2 个主要侧重点。

四、CELSS 的基本生物学问题

1. 空间科学对 CELSS 的需求

空间站的建立标志着人类有了开拓天疆的起点,但并不意味着人类有了开拓天疆的能力。解决这一问题的主要途径,首先是解决生保系统的自给自足或部分自给自足问题。例如,从地球到火星往返需要 2 年(730 天),如果按每人每天所需水、食品、空气和储存废物(二氧化碳、液体和固体废物)的重量是 24 公斤,加上必要的包装重量 19 公斤,总重按 43 公斤估算,一次 10 名宇航员的火星之行约需 314 吨生保用品。如在月球建立一个 100 人的移民区,每 90 天就要供应 387 吨生保用品。照目前发射费用每公斤 1 万美元计算,不仅费用惊人,而且运载工具也是个难题。如不设法闭合生保系统碳的回路,不要说扬帆远航和空间移民,就连近地轨道空间资源的开发和利用也要受到限制。

2. CELSS 的关键技术

CELSS 实际上是一个以植物光合作用为基础的人工生物圈,最基本的功能是在最小的面积上通过光能转化提供宇航员生命的需求。关键问题大体上可以分为光能转化、生物(链)转化和废物处理 3 个部分,其中光能转化和废物处理是最基本的两项关键技术。这两项技术现在看来都有突破。

(1) 植物的光能转化 早在 60 年代,我国著名植物生理学家殷宏章教授就曾提出过利用植物的光合作用来闭合生保系统的空气更新和碳(食品)的回路,欧美各国,特别是前苏联曾主张用小球藻来闭合生保系统氧和碳的回路。后经研究发现,按单位重量计算,藻的光合作用效率不一定比高等植物高(按体积计,比高等植物高)。更重要的是,藻类作为食品不仅不容易消化,而且口感极差。到了 80 年代,地面模拟研究基本确定,作为生物再生式生保系统,高等植物是不可替代的。

据美国 Utah 大学 Salisbury 估算,一个宇航员每天平均需要 11 700kJ 的能量,相当于 135W($W=J\cdot s^{-1}$)。如果高等植物光能转化效率按 12% 计算,每位宇航员每天的光能需要量是 1.13kW。但植物的可食用部分只有 45~80%,因此宇航员每人每天的光能实际需要量是 1.4~2.5kW。在每平方米太阳光的光合作用能量是 0.5kW 的情况下,有 3~5 平方米的高等植物种植面积就可以满足 1 个宇航员的食品需求。保证宇航员所需食品的绿色面积,也能保证宇航员对氧的需求。在 NASA 的资助下,美国

Utah 州立大学开始研究将来用于 CELSS 的小麦最大产量栽培法, 研究重点是受控条件下整个作物覆盖的光合作用效率。他们根据小麦主穗大开花早的特点, 通过高密度 (2 000 株/平方米) 限制分蘖的栽培法, 每天照光 20 小时, 光/暗比是 20/4, 昼夜温差是 5℃ (白天 20℃/晚上 15℃), 小麦的生活周期是 79 天。在最高的辐照条件下, 产量是 60 克/平方米/天, 有 13 平方米的种植面积可以满足 1 名宇航员对食品的需求。如能培育出光能转化效率更高、生活周期更短的小麦品种, 种植面积还有可能进一步减少。另外, NASA 支持的 Wisconsin 大学研究的马铃薯、Purdue 大学的莴苣和种子油料作物、北加州大学的大豆和阿拉巴马 Tuskegee 研究所的甘薯正在进行之中。

(2) 废物处理的湿氧化技术 在 CELSS 中如何选择不同生物种, 沟通植物和人之间的物质循环, 是关系到提高 CELSS 经济效益的有效途径的问题。这种沟通实际上是借用地球上的生物链现象, 完成生态型循环。这将是一项长期而又艰巨的任务, 可能有一个逐步实现的过程, 也许在空间有限的环境中永远也不能沟通物质实现 100% 的循环。最理想的预测, 是完成 97% 的循环, 还有 3% 的废物要靠化学处理, 不足部分要靠地面补充。因此, 废物处理是 CELSS 的一项关键技术。这项技术实际上已经建立。实验证明, 当水被加热和加压到其临界点以上时 (温度超过 374℃ 和压力大于 22 兆帕), 其介电常数由 80 下降到接近 0, 不溶性物质, 如氧气和氮气可以溶解; 可溶性物质, 如 NaCl 沉淀出来。在这样的条件下, 有机物质很快 (几秒钟之内) 就会氧化成 CO₂ 和灰分, 供植物利用。

3. CELSS 的地面模拟研究

前苏联在 60 年代末开始地面模拟研究, 他们在西伯利亚 Krasnoyarsk 有一实验室, 早就获得仅 8 平方米致密培养的小球藻就可满足人对氧需求的成果。后因用小球藻做成的食品无法食用, 才改建 1 座名为生物圈 3 (Bios 3) 的封闭系统, 体积是 300 立方米, 占地 63 平方米。内有 3 间种植植物的人工气候室 (phytotrons)、3 间寝室、1 间厨房、1 间实验室和 1 间控制室。3 个人工气候室中有 2 间种小麦, 另一间种铁荸荠、豌豆、马铃薯、胡萝卜、萝卜、番茄、胡瓜、莴苣和球茎甘蓝。马铃薯、球茎甘蓝和豌豆每天照光 16 小时, 小麦和其他作物是连续照光, 所有作物都是水培。控制室内有小麦加工设备, 燃烧不可食用生物量的催化炉, 执行修理和测量设备。1972 年开始, 直到 1984 年, 先后进行过 10 年的模拟实验, 每次有 2 个或 3 个志愿者在生物圈 3 中生活过 4 到 6 个月。实验中, 空气通过泵入人工气候室得到部分更新, 有机污染通过热催化的过滤系统被破坏掉, 植物蒸腾的蒸汽冷却备用。饮用水通过离子交换过滤, 其他用水则经过煮沸。每人每天消费 300 克小麦、100 克铁荸荠根和 500 多克新鲜蔬菜。约 75~80% 的食品是在生物圈 3 中种植的, 其余部分是实验开始前带进去的。实验期间人在生物圈 3 内不是种植和照料作物, 就是管理设备, 并接受医疗监护, 以保持健康状态。前苏联的这些实验结果, 证明 CELSS 原理是可行的。

应当指出, 1987 年美国在亚利桑那州也建造过

一座占地 2.25 英亩的生物圈 II, 内有一个占地 2.4 万平方英尺的农场、5 个人工生态系统和一个 8 人的住民区, 用来研究封闭系统中生态平衡问题。只可惜由于管理上的原因, NASA 没有介入。

4. CELSS 的生物学问题

1984 年在奥地利召开的 25 届 COSPAR 上, NASA/Ames 中心的 MacElroy 指出: 现在建立 CELSS 的主要问题不是工程技术上的问题, 而是生物学问题。

CELSS 中的生物学问题除了选育适合 CELSS 栽培的植物品种外, 主要是植物发育生理学问题。众所周知, 植物发育有遗传、机体和环境 3 种控制方式。拿机体控制方式来说, 植物的特点是极性生长。不同部位合成不同的激素, 这些激素通过运输在植物体内形成极性分布, 影响植物发育过程。在受控环境中, 地上部和地下部, 究竟应当采取哪些环境条件才能使植物各部分协调生长, 达到最大的栽培目的, 显然是 CELSS 的关键。法国推出的 G3A (chambres de culture automatique en atmospheres artificielles) 系统、俄国和平号空间站和德国哥伦布舱中的轨道温室, 都是为研究 CELSS 中的植物生理学基础问题设置的。

值得指出的是, 任何一种生物在空间有限的环境中对其本身生存来说都是一种污染源, 植物也不例外。因此, 在 CELSS 的植物栽培过程中必须随时注意清除这种污染。

此外, CELSS 中的物种配置, 包括生物转化和水生生物的生态学问题是提高 CELSS 物质转化效率的另一重要方面, 也是 CELSS 持续发展的前提。

总之, 从国际发展动向来看, 利用空间微重力资源解决重力的细胞生物学问题; 发展空间生物加工有关的空间生物技术造福于民; 深入研究人在空间的医学与生理学问题, 保障宇航员长期健康的空间工作和生活; 开展受控生态生命支持系统中基本生物学问题的研究, 着手解决增强人在空间自主性问题, 是 21 世纪空间生命科学和空间生物技术的主要发展方向。由于空间生命科学和空间生物技术所研究的问题很多和地面有关, 例如, 空间病的生理学问题, 有很多类似地面老年病的生理学问题; 受控生态生命支持系统中的植物发育生理学和物种配置问题, 很多和地面大棚栽培, 特别是极地大棚栽培中的植物发育生理学及水生生物的生态平衡问题是一致的, 因此, 随着空间生命科学和空间生物技术的发展, 也必将带动地面有关学科的发展。

主要参考文献

- [1] Krikorian AD., 1996, Strategies for "minimal growth maintenance" of cell cultures: a perspective on management for extended duration experimentation in the microgravity environment of a space station. Botanical Review, 62: 42-86
- [2] Mesland, DAM., 1992, Mechanisms of gravity effects on cells: are there gravitiesensitive windows? Adv. In Space Biology and Medicine, 2: 211-228
- [3] Goodwin, TJ., TL Prewett, DA. Wolf and GF. Spaulding, 1993, Reduced shear stress: a major component in the ability of mammalian tissues to form three-dimensional assemblies in simulated microgravity. J. Cell. Biochem., 51: 301-311

(下转第 40 页)

代表入海流量。在 20 世纪 70 年代以前,大通流量在 $10\,000\text{m}^3/\text{s}$ 时,河口一般没有显著的盐水入侵。然而,1979 年 3 月大通流量 $10\,400\text{m}^3/\text{s}$ 时,长江口盐水却入侵至上海吴淞水厂,氯度高达 $1\,360\text{PPM}$ (国家饮用水标准为氯度低于 250PPM)。由此估计,实际到达河口段的淡水流量应在 $5\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以下,比大通流量少 $5\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上。盐水控制长江河口段水域并影响到太湖以东三角洲平原腹地,对江苏省和上海市工业、农业与人民生活已造成极为严重的影响。

流域内部耗水量的大幅度增长与跨流域调水增大是造成枯季流量大幅下降的直接原因,致使近 20 年长江口盐水入侵的频率与强度比 20 年前显著上升。据估算,早在 1979 年枯季,汉口一大通之间的枯季耗水量就已达 $1\,500\sim 2\,000\text{m}^3/\text{s}$,这一年大通最低流量仅 $4\,620\text{m}^3/\text{s}$;同时大通以下的用水消耗又使长江入海水量下降 $1\,000\sim 1\,500\text{m}^3/\text{s}$,致使该年长江入海流量大幅度下降,长江口外盐水大幅度入侵,严重影响了长江三角洲的社会经济与人民生活。

近几十年来,长江流域人类活动对流域地生态环境的影响正在日益强烈地显现出来。1998 年长江中游 20~25 年一遇的洪水量却产生了百年不遇的洪水位;1999 年初特枯水位对长江航道的严重影响及长江口的盐水入侵亦是长江洪枯水情向两极化发展的表现。

在我国目前正在实施或规划的长江水资源利用工程项目中,除国家级的南水北调东线工程(从现有规模增至 $1\,000\text{m}^3/\text{s}$,年调水 191亿 m^3)、中线工程(年调水 141亿 m^3)与西线工程(年调水 200亿 m^3)外,还有地方性的引水工程,如泰州引江工程($400\text{m}^3/\text{s}$),太湖流域从长江调水($680\text{m}^3/\text{s}$)等。这些工程对长江枯季入海流量均将产生不同程度的影响。同时,长江流域内部耗水量迅速增长态势亦将进一步减少枯季入海流量。三峡工程建成后,若不考虑三峡水库上游西线调水的影响,约可增加 $1\,000\sim 2\,000\text{m}^3/\text{s}$ 枯季流量,但这与上述新增出来的水资源需求相比,差之甚远。加之洞庭湖与鄱阳湖等大中型湖泊的调蓄能力又在迅速衰退,对稳定长江干流枯季流量带来不利影响。另一方面,在 21 世纪,长江流域将面临全球气候变化的影响,将导致流域(特别是上游地区)气候与水文过程的变化,这对枯季流量下降的影响深远。过去几十年我国西部高原冰川与湖泊的动

(上接第 45 页)

- [4] Carter DC, et al., 1999, PCAM: a multi-user facility-based protein crystallization apparatus for microgravity. *J Crystal Growth*, 196: 610-622
- [5] McPherson, A., 1997, Recent advances in the microgravity crystallization of biological macromolecules. *TIBTECH* 15: 197-200
- [6] Hamppe, RE., Hoffmann, K. Schonherr, P. Johann and L. De

态,已显示出值得我们警惕的趋势变化。如岷江流域,由于上游植被的破坏,某些子流域水文过程已呈明显的两极变化,洪季来水往往过猛,而枯季年份最小流量呈现下降趋势。

21 世纪长江枯季入海流量将如何变化,是决策部门必须高度重视的大问题。长江三角洲面积虽只占全国土地总面积的 1%,但 GDP 在全国的比重却高达 15.1%,财政收入占全国的 18.7%,其中属中央财政收入的,占全国的 22.6%。此外,长江三角洲未来的发展将直接影响长江流域的发展前景。毫无疑问,确保长江三角洲水资源的可持续利用,对实现我国 21 世纪战略目标具有决定性的意义。所以,对 21 世纪长江枯季入海流量的变化趋势亟待深入研究、加强认识。必须从自然地理条件与经济权重这两个方面,充分警觉到确保长江流域及三角洲可持续发展的必要性。从我国黄河、淮河和长江流域的历年干旱史料记载来看,黄河、淮河和长江流域 3 个地区之间降水的时间段与空间场,在不同年份呈现不同特征。总的来说,若在 5~9 月长江多水季节实施南水北调,一般不会对长江三角洲水资源产生显著影响。在其它的月份,当长江的流量偏多时,适度的调水也不会对长江中下游产生重大影响,但对调水量亦要严格控制。而最大、最难的问题恰是,当北方黄河与淮河流域出现干旱,同时长江流域流量又偏少时,如何确保长江枯季必须的入海流量。为此,我们建议:

1. 结合海平面上升与河口大型工程产生的影响,深入研究入海小流量背景下长江口盐水入侵的机制及其对长江入海流量变化的响应规律。
2. 建立长江枯季入海流量的监测系统,对沿江抽江与引江的水量开展调查,高度重视并研究安徽大通水文站以下长江径流量的变化,并针对性地进行有效的管理与控制。
3. 南水北调工程的设计,必须顾及对长江枯季入海流量变化可能产生的影响,必须把稳定长江枯季入海流量作为工程设计与运作的前提条件。在评价某一工程的影响时,也必须叠加其它工程对长江枯季入海流量变化的影响。
4. 抓紧研究制定《长江法》,必须把稳定枯季长江入海流量列为重要的法定内容之一。

(责任编辑 蔡德诚)

- Filippis, 1997, Fusion and metabolism of plant cells as affected by microgravity. *Planta* 203: S42-53
- [7] Space Science Board, National Research Council, 1998, A strategy for space biology and medical science for next century. National Academy Press, Washington, D. C.

(删去 18 篇英文参考资料)

(责任编辑 王宏章)