

空间生物学研究最新进展 (1996—1997)

I. 当前热点和对重力感受传导的研究^{*}

刘永定

(中国科学院水生生物研究所 武汉 430072)

摘要

通过 1996—1997 年间涉及空间生物学领域的最新文献综述研究,可以看出该领域的主要研究方向包括空间飞行或微重力条件下生物体的生长发育、代谢、行为、细胞和组织、遗传和分子生物学、神经和免疫、重力感受传导、种群和系统、方法、应用等 10 个方面.在此基础上,侧重说明空间生物学领域中微重力生物学、空间生理学、空间细胞和组织工程、空间探索几个热点的最近研究状况,以及生物体对重力感受传导这一基本理论问题的若干进展.

关键词 空间生物学 — 研究进展 — 重力感受

空间科学和生命科学都是当今自然科学的重大学科,也将是在 21 世纪有不可估量前景的重要学科领域.空间生物学是空间科学和生命科学交叉的新兴学科,其中微重力生物学是当代科学发展的前沿之一.近 20 年来,微重力生物学蓬勃兴起并迅速发展,该领域的科学研究从发现微重力生物学现象迅速转入了探索机理、揭示规律的阶段.作者根据国际上 36 种重要学术刊物在 1996—1997 年间发表的空间生物学和微重力生物学论文,结合我国的实际研究工作进行了分析,将当前国际上空间生物学研究中以微重力生物学研究为主的 10 个突出方向,和国内一些研究机构正在探索的 8 个微重力生物学问题归纳成综述,并提出一些讨论.

当前所关注的空间生物学领域的热点有:微重力生物学、空间生理学、空间细胞和组织工程、空间探索.许多科学家分别在空间生物学的下列研究方向上取得了持续的进展,它们是:空间飞行或微重力条件下生物体的生长发育、代谢、行为、细胞和组织、遗传和分子生物学、神经和免疫、重力感受传导、生物种群和系统的空间效应、空间生物学方法、以及空间生物学应用.我国的科研机构正在从事的研究主要包括:衰老与自由基、胁迫应激反应、空间定向、钙的信使作用、膜的感受传导、种群变化与个体变化、生长和发育、细胞培养等.本文侧重说明上述几个研究热点方面的最新状况,以及生物体对重力的感受传导传输这一基本理论问题的若干研究进展.

^{*} 国家载人航天工程资助项目

1 空间生物学当前的几个热点

1.1 微重力生物学

利用对各种类型模式生物进行全面深入的研究,揭示普遍的和特有的生物学规律,是空间生物学研究的重要途径.大肠杆菌、单细胞藻类、伞菌、拟南芥、鱼、鼠等都是通常用于建立生物模型的材料.在模型和机理研究方面, Cogoli^[2], Boda^[1]等人曾概括地作了归纳. Klaus等人^[8]以大肠杆菌为模式生物,研究了空间飞行产生的影响,提出了一个崭新的基本物理机理模型;系统地分析空间飞行对微生物生长各个阶段(延滞期、指数期和静止期)的影响,用大肠杆菌(*Escherichia coli*)的悬浮培养物,7次在美国航天飞机的搭载飞行中进行了一系列实验.结果表明,空间飞行使得延滞期缩短,指数生长期增长,种群密度最后大约增长一倍.根据所累积的实验数据,他分析每一个特定生长期的独特变化和重力对细胞外物质运输的作用,并作出了模型,进而提出重力对悬浮细胞的累积效应是通过对其流体环境而产生影响.在以前的研究中,重力在流体环境中对细胞的瞬时、直接的影响可能被忽略了. Moore^[9]报道,通常将伞菌子实体对重力方向变化作出反应而发生的形态改变称之为向重性(gravitropism).而有人却喜欢称之为重力形态发生(gravimorphogenesis),后者强调通过实验探讨重力与形态发生或变化的关系.他研究了2种伞菌:鬼伞 *Coprinus cinereus* 和 *Flammulina velutipes*, 并采用最新技术,包括影视分析、各种类型的电子显微镜、计算机辅助影象分析和空间在轨实验.2种生物对重力的反应有差异.这与它们的生态适应性和结构适应性相关. *C. cinereus* 的反应极其迅速,它的子实体能在3h内由水平状态恢复成垂直,而 *F. velutipes* 则需要12h弯曲90°.2种真菌的菌块组织对重力的反应也不相同.正常情况下 *C. cinereus* 的顶端向下弯曲,其中间有一个延展数厘米的区间.而 *F. velutipes* 的重力感受却仅仅限于伞帽下面几个毫米的区域,虽然其弯曲范围亦可达到下面2cm.1993年在空间实验室D-2飞行中搭载了 *F. velutipes* 培养物,其子实体在轨道飞行中迷失方向,从而第一次确切地证明向重性是对单方向的重力矢量的一种反应.以不同的旋转速度用 *F. velutipes* 作回旋器实验,说明其对重力感知的临界值是大约 10^{-4} g. *C. cinereus* 的感知时间是7min,它们对重力的连续反应需要有连续的变重力刺激.测定 *C. cinereus* 的细胞体积,证明其假茎细胞的长度增加而其直径并不增加,因而发生生长差异.在 *F. velutipes* 细胞中,一种独特的高度电子透明的微空胞在分布上发生变化.在方向混乱的几分钟之内,其水平子实体上部细胞中的微空胞有所减少,下部的细胞中则有所增加.这有助于空胞的膨大,而空胞膨大又伴随或者驱动细胞的拉长.各种代谢抑制剂实验的结果说明,第二信使钙也参与调节在重力形态发生中出现的生长差异,但重力感知不受这些代谢抑制剂的影响.二种伞菌 *F. velutipes* 和 *C. cinereus* 的重力感知似乎依赖于肌动蛋白细胞骨架,因为用细胞松弛素(细胞分裂抑素)处理后,抑制了 *F. velutipes* 的向重弯曲, *C. cinereus* 的弯曲则明显延迟,假茎未伸展.结合从活菌丝体上观察到的在重新定向过程中细胞核的变化考虑,似乎意味着重力感知必须包含作用于肌动蛋白细胞骨架的平衡石(可能细胞核)和激发由内膜系统释放的

特有的泡囊或微空胞。

在细胞微重力生物学研究方面, Sievers 等^[12]报道了植物顶端生长细胞的重力感受。指出除了根和苗的平衡细胞,许多顶端生长的细胞也对重力敏感,同时重力也作用于细胞的生长和发育。由于这些顶端生长的细胞非常适合离体观察,因而能够仔细地研究其平衡石的运动和沉积。用光学显微镜能够监测通过离心、药物应用或者微重力等手段进行的实验操纵。平衡石通过与肌动蛋白丝或微管的相互作用定位于细胞质的不同区域内,它们的沉积范围似乎限定得很窄。由于重力感受和重力反应发生在同一个细胞,向重信号传导链并不因感受和反应细胞之间的信号发送而复杂化。由于对顶端生长细胞的研究,现在已能系统地解释正向和负向向重性的机理。

Tairbekov^[13]描述了细胞重力感受的通用原则,综述了过去多年对不同类型细胞重力感受机理的研究,即在实验室用回旋器和离心机模拟变重力及在空间飞行条件下研究的结果。同时对所获结果与已发表的数据进行了比较分析,表明除了不同类型细胞对变重力(包括微重力)的特有适应性外,还有细胞结构-功能建构这一共同的因素对变重力的适应性。解释了细胞重力感受的完整的分子机理,系统地阐述了细胞重力感受的普遍原理和假说。

1.2 空间生理学

生理学研究是生物学中既古老而又层出不穷的领域,当代生理学研究是与生物学其他分支密切相联的。最近二年,植物空间生理学、动物空间生理学和人体空间生理学等方面的最新进展主要有: Johnson^[6]报道了最近在地球上和在空间研究植物屈垂运动(回转头, Circumnutations)的实验结果,讨论了过去几十年空间环境方面的实验,特别着重于分析重力和空间环境的关系,总结了微重力实验及与之对应的地基实验的新结果,提出了与空间活动相关的一些问题。Tipton^[15]报道了用模式动物研究人类在微重力中的生理反应的实验结果。通过用卧床和头朝下(head-down tilt, HDT)的方法做的1g条件人体实验,以及尾悬挂、头朝下、后肢不承重的动物模型试验,提出对微重力梯度变化的生理效应与流体前部位缺少变形力相关。因为用HDT方法以鼠为模型来研究模拟重力效应对人体肌肉骨骼系统的影响取得成功,这一模型现已被用于研究重力对人体和其他脊椎动物心肺系统的影响。迄今的结果说明,这个模型是有效的,可用以获得与血液量、红细胞生成、心脏容积、气压感受敏感性、碳水化合物代谢、飞行后最大O₂容量和心脏输出量等参数相关的有可比性的变化结果。该模型在研究相应的机理方面也非常有用。悬挂模型可望揭示毛细血管氧分压在空间的变化和HDT实验中动脉的氧分压变化。然而,该模型是否可以对肾上腺素感受器受体的向上或向下的调节提供解释还不能确定。并且许多研究者相信,不应该在HDT试验之后接着进行重力定向对人体或动物肺功能影响的研究。总的说,悬尾的动物模型用来研究飞行中和飞行后的人类生理反应和机理是相当好的。

NASA的Vernikos^[16]描述了人类在空间的生理学。他认为,重力在日常生活中的普遍存在使得人们难以了解其在生物形态学和生理学中的重要性。在1g重力下,创立了骨骼和肌肉支撑系统,发育了各种细胞的泵,组成了神经元,并有了各种对生物学信号的重力作用力的受体和导体。空间飞行提供绝无仅有的微重力环境,这一环境中的系统实验

能扩展我们对重力生理学的基础知识,也许还能提供新的对通常生理学和疾病过程的见解,包括我们的身体对感知信息的惊人依赖程度,对在体内负载重量的结构如肌肉、骨骼内部产生各种力的效果和重要性.这方面的工作对人类进一步探索太阳系的活动也将十分重要.

1.3 微重力细胞培养和组织工程

微重力细胞培养和组织工程是当前空间生物学界的另一个热点. Freed 和 Vunjak-novakovic^[3] 用分离的细胞,三维聚合物支架,和在模拟微重力条件下转动的生物反应器做了组织工程研究.用软骨和心两种类型的细胞,通过调整瓶子转动的速度,将 10 mm 直径 × 2 mm 厚度的细胞-聚合物置于连续自由下落的状态下培养,证明了其可行性.模拟的微重力条件促进由圆形细胞、胶原蛋白与葡糖胺葡聚糖(GAG)组成的软骨结构的形成,和由自动同步收缩的拉长细胞组成的心组织结构的形成.实验设置 4 组培养条件:旋转生物反应器中的模拟微重力,旋转生物反应器中的转动固定物体,旋转瓶中的搅动混合,培养皿中的轨迹混合.通过比较生长在 4 组培养条件下的离体软骨结构的组成证明了模拟微重力环境对组织工程技术的优越性.生长在模拟微重力中的软骨结构含有的总再生组织量(结构干重的百分数)和 GAG(软骨经受压迫所要求的组成成分)量最高.

1.4 空间探索

空间生物学及其分支微重力生物学的目的是探索生命形式在空间的奥秘和开发空间资源,包括微重力资源,从而为居住在地球上的人类服务、为人类长期空间飞行乃至空间生存服务.1997年7月4日,美国的火星探路者首次登陆火星,完成了一次非常杰出的试验飞行.探路者发回的照片及由火星漫游车索杰纳进行的勘察、分析证明,火星曾经有可维持生命的条件.美国《科学》周刊将探路者的火星之旅评为位于克隆羊之后的1997年世界第二大科学进步;美国《大众科学》将其列入1997年度100项最佳成果之中.

在此前5年,Bagne报道NASA Ames中心的McKay以地基研究为基础,对在火星上建立生物群落乃至人类定居点提出的技术方案.他从讨论过去发自火星的数据出发,认为无论是靠简单的植物比如藻类,还是人类本身,水是绝对必要的条件.建议建构定居点的程序,即以火星的土壤创造温室气体,以引入的植物有机体制造氧气,形成温暖的大气.NASA的研究与当前在南极的研究相似.从地基研究结果论证了火星探索的必要性和技术的可行性,预研了使用遥控机器人在功能和运转方面的作用,以及在另一个星球建立人类定居点在伦理和社会原则方面的问题.

2 重力感受和传导传输

重力感受、传导、传输是当今微重力空间生物学效应机理研究中一个最令人感兴趣的问题,也是一个只有借助于微重力科学的研究手段才能得以揭密的科学问题.已经提出的假说或理论有许多,如重力敏感窗学说、最小功能单位假说、平衡石理论、细胞骨架理论、质膜理论等等.越来越多而又仍然不足的科学数据正在深化对这一问题认识.

2.1 植物的重力感受和传导

对植物的重力感受与传导的研究比较多, 从植物顶端的正负向地性着手研究比较容易. 德国的 Weisenseel 和 Meyer^[19] 总结了重力改变引起的生物电参数变化, 及其对植物的重力感受、重力激发量、传导、传输的意义. 过去几十年, 累积的科学资料已经证明重力在表面电势、膜电压、内源电流和离子流等方面诱导产生各种变化. 这些变化说明质膜是重力信号感受和传导的位置. 目前已有理由认为重力影响质膜离子通道 (特别是 Ca^{2+} 离子通道) 的状态和离子泵 (特别是电子发生的 H^+ -ATP 酶) 的活性, 导致离子活性和膜电压发生细胞内非细胞质的变化. H^+ 流和 Ca^{2+} 流可能是将重力信息放大并从感受细胞传送到反应细胞的手段. 迄今尚没有关于微重力影响生物电诸参数的科学数据, 不过应该了解植物长期处于微重力条件下是否会对重力过度敏感. 若果如此, 植物回到地面后则可能激发作用电势, 因为 1g 条件可以激活已适应微重力的植物更多的 Ca^{2+} 离子通道.

空间实验为分析植物根的重力传感机理提供了独特的机会. Perbal 等人^[10] 研究了在微重力中生长的幼苗根的平衡细胞极性和重力敏感性. 已经证明, 在地面观察到的平衡细胞严格的结构极性在微重力下被搅乱: 至少在一些细胞中淀粉体移动到基部那一半去, 核则移位到靠近远离基部的质膜. 这也就证明淀粉体在细胞质中不是自由移动. 用细胞松弛素 B(或 D) 处理, 说明这些细胞器可能由传动蛋白附着在肌动蛋白网上. 这些发现引导产生一个关于重力感受的假说, 其基本观点是肌动蛋白微丝与平衡石相互作用产生的张力被传输到位于质膜上激活伸缩的离子通道. 近来, 已证明在轨道上 1g 条件下生长的根, 其敏感性比微重力条件下或在回旋器上模拟失重条件下生长的差. 由于淀粉体在微重力条件下与在 1g 条件下不同, 在微重力下有较大的敏感性可能是由于肌动蛋白的张力不同.

Karlson 等^[7] 系列地研究了燕麦胚芽鞘在空间和在回旋器上的向重反应, 包括低重力对胚芽鞘弯曲的影响. 因为在记录重力反应的同时, 重力存在, 人们往往难于精确地描述植物的向重弯曲反应. 所以, 胚芽鞘不同部位精确的向重反应, 在弯曲过程中有无植物生长激素传输, 以及植物对低重力刺激如何反应等问题的研究, 只有在失重条件下才能实现. 为此, 测定了燕麦胚芽鞘经受横向、低重力刺激后离顶端不同距离的反应. 实验在地球轨道航天飞机空间实验室中完成. 受试植物栽培在 1.0g 离心机上. 加速作用的刺激在 0.1—1.0g 之间; 历时 2—130min 不等. 全部反应均用录像带记录. 向重反应在顶端部分几乎同时开始, 基部发生较迟. 反应到最大之后, 顶端部位的向重弯曲表现出清晰的自养反应, 而在基部未见. 在几个重力水平上记录到胚芽鞘的基部最初发生不正常的弯曲. 沿着胚芽鞘越往下, 各个部位最大向重弯曲发生得越迟. 比如, 在 25g·min 的一个刺激后, 最大的弯曲沿着胚芽鞘向下移动, 在上部的速度为大约 $50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 下部为 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. 据此结论, 植物生长激素从上往下向基输送 (basipetal transport) 只能或多或少地作用于向重弯曲程度, 因为其输送速度低得多. 各个部位的反应控制该部位的弯曲程度 (即使生长激素向基输送确实加入反应过程). 从刺激—反应曲线外推, 可以测出沿胚芽鞘的各部位的临界刺激时间. 沿胚芽鞘各单个部位的数据与交互作用定理 (reciprocity law) 没有冲突.

Volkman 和 Tewinkel^[17,18] 讨论了十字花科植物根的重力敏感性—微重力中传感器生理学的各种专一条件的临界值, 以及在变重力作用下的向重反应. 通过空间实验室 IML-2

飞行中的实验,首次在微重力和精确的生理条件下测定了十字花科植物拟南芥重力反应的“最小激发量”(dose=stimulus×time= constant,与重力相关的3个阈值之一),以评估交互作用定理.将幼苗从干种子起种植在空间轨道的1g离心机上和微重力条件下,经连续运转,发现在微重力环境中的根比在1g条件下更敏感,前者的最小激发量为20—30g·s,后者为50—60g·s.这一结果与低速回转器测得的临界值12g·s不相同.对微重力生长的根进行间歇刺激,间歇时间118s,观察到引起反应的相间隔的二次刺激的最小激发量为13.5g·s.证明高等植物能够“汇总”低于临界值的刺激.对重力刺激临界值范围内的细胞结构的实时显微镜录像观察,证明根区平衡细胞中的平衡石有小的位移($< 1\mu\text{m}$)向重弯曲与平衡石位移之间有明显的相互关系.同时,尽管运用相同的激发量,根对0.1g的反应显著弱于对1g的反应.在微重力条件下栽培植株的根比在1g离心机上的更敏感.该研究以及结合以前的结果不能确认交互作用定理的有效性.如果接受平衡石理论,便可作出结论,即重力刺激的转化一定发生在细胞质内平衡石周围,并且其转化刺激的系统(可能包含细胞骨架成分)一定是在微重力幼苗栽培中已经受到了影响.

2.2 动物的重力感受与传导

Cogoli的空间生物学实验室就淋巴细胞的重力感受和反应作了长期研究.最近,他们进一步报道了微重力条件下淋巴细胞的激活信号^[11].以前多次空间实验室飞行中观察到的几乎全部失去激活作用的现象,可能是由于单核细胞缺失而产生白细胞介素1(IL-1)的原因.为了证明这一假说,在或以不以外源重组的IL-1或者IL-1+IL-2与刀豆球蛋白A共同用于激活人体外周血液淋巴细胞和单核细胞.虽然在轨飞行中1g参照离心机于添加激活剂时停顿了60min,使飞行中1g条件下的数据不可靠,但是,结合以前在SLS-1上完成的实验,证明飞行中1g离心机和地面1g对照没有差别.通过比较空间0g培养物的数据和地面1g同步对照的数据,证明外源IL-1和IL-2不能克服在0g条件下活性的损失(测定有丝分裂指数表示);而 γ -干扰素的合成则部分地得以回复.所以,对比以前的空间实验研究,IL-1的产生没有被抑制.

2.3 单细胞生物的重力感受与传导

鞭毛藻类 德国Hader实验室长期研究鞭毛生物的空间定向,在完成空间三维实时定向研究的基础上,进一步从鞭毛生物的重力定向推向研究这类生物的重力感受^[4].结果说明鞭毛生物纤丝裸藻*Euglena gracilis Klebs*的趋重性是由一个活跃的生理受体调节的,而不是细胞在水柱中被动排列的结果.裸藻置于美国哥伦比亚航天飞机上搭载飞行,其间细胞经受了0—1.5g之间的不同加速作用,发现趋重反应临界值介于0.08—0.16g之间.在整个飞行中,没有观察到趋重反应在微重力环境中的适应性改变.整个细胞体而不是细胞内的细胞器起着平衡石的作用.因为将细胞悬浮在经调整密度的培养基(Ficoll)后趋重性受到抑制,在较高的密度下甚至发生定向倒转.这就是说,细胞质似乎对相对居下的膜起着产生压力的作用.用抑制剂钆(Gd)研究说明,可以假设该部位是专门激活对张力敏感性的离子通道.存在一个重力感受传导链,该链前部的某个步骤是一个调整膜势的地方,因为离子通道阻隔剂、离子载体和ATPase抑制剂强烈地抑制这一鞭毛生物的趋重

作用而不严重地影响其运动性和趋光性。

原生动物 Hader 实验室也对草履虫 (*Paramecium biaurelia*) 的空间三维定向和行为作了多年的研究。根据近期在地面和空间的实验结果, 他们描述了在不同加速作用下草履虫的重力反应^[5], 在地面和空间飞行中用离心机显微镜研究了草履虫对低于 1g 和高达 5g 的不同加速作用的行为。增加重力刺激到过重力 (hypergravity) 程度, 在几秒内便提高负的趋重性及重力作用的生物反应。细胞不适应改变的重力作用条件。重复刺激不改变草履虫的重力反应。诱导趋重性的最小加速作用在 0.16—0.3g 之间。

细菌 Thevenet 等^[14] 报道用 ESA 的生物架 (Biorack) 所作的信号实验, 描述了微重力条件下的大肠杆菌。微重力影响流体的某些物理特性, 如对流运动、表面张力。结果表明, 细胞和活的有机体可能在空间表现不同的行为。这是由于细胞直接的微环境差异和微重力条件下膜结构的变化。用非病原的革兰氏阴性菌菌株作了二个实验, 研究微重力对细胞微环境的影响和重力信号如何通过膜传导。结果说明: (1) 微重力看来缩短了大肠杆菌无运动培养物的延滞期; (2) 在微重力条件下, 由 EnvZ-OmpR 两个组份调节的 OmpC 基因同样被诱导或比地面对照更好。

由此可见, 无论研究者使用何种材料, 多细胞的还是单细胞, 植物、动物、还是微生物, 无不都是为了了解生物体或生物细胞对变重力反应的行为, 揭示重力感受转导传输的位置、途径、基本过程、基本结构、刺激的临界值和范围、响应刺激的条件。这些研究最终将导致对空间生命现象和生命过程的理论认识, 为新的技术发展提供正确的依据。

参 考 文 献

- [1] Boda K. 2nd symposium AVIAN microgravity, introduction. *Acta Veterinaria Brno.*, 1996, **65**(1):4
- [2] Cogoli A. Biology under microgravity conditions in spacelab, International Microgravity Laboratory 2 (IML-2). *Preface. J. Biotech.*, 1996, **47**(2/3):67—70
- [3] Freed L E, Vunjaknovakovic G. Microgravity tissue engineering. *Vitro. Cellular Develop. Biol. Animal*, 1997, **33**(5):381—385
- [4] Hader D P, Hemmersbach R. Gravidirection and graviorientation in flagellates. *Planta*, 1997, **203**:7—10
- [5] Hemmersbach R, Voormanns R, Hader D P. Gravidirections in *Paramecium biaurelia* under different accelerations—Studies on the ground and in space. *J. Exper. Biol.*, 1996, **199**(10):2199—2205
- [6] Johnson A. Circumnutations —Results from recent experiments on earth and in space. *Planta*, 1997, **203**:147—158
- [7] Karlson C, Johnson A, Chapman D K, Brown A H. Gravitropic responses of the *Avena coleoptile* in space and on clinostats. 3. Hypógravity effects on coleoptile curvatures. *Physiol. Plantarum.*, 1996, **98**(2):325—332
- [8] Klaus D, Simske S, Todd P, Stodieck L. Investigation of space flight effects on *Escherichia coli* and a proposed model of underlying physical mechanisms. *Microbiology UK*, 1997, **143**:449—455
- [9] Moore D, Hock B, Greening J P, Kern V D, Frazer L N, Monzer J. Centenary review—Gravimorphogenesis in agarics. *Mycol. Res.*, 1996, **100**:257—273
- [10] Perbal G, Drissecole D, Tewinkel M, Volkmann D. Statocyte polarity and gravisensitivity in seedling roots grown in microgravity. *Planta*, 1997, **203**:57—62

- [11] Pippia P, Sciola L, Cogoli G M, Meloni M A, Spano A, Cogoli A. Activation signals of T lymphocytes in microgravity. *J. Biotech.*, 1996, **47**(2/3):215—222
- [12] Sievers A, Buchen B, Hodick D. Gravity sensing in tip-growing cells. *Trends Plant Sci.*, 1996, **1**(8):273—279
- [13] Tairbekov M G. General principles of gravisensing by the cells. *Izvestiya Akad. Nauk Seriya Biol.*, 1996, (2):133—140
- [14] Thevenet D, Dari R, Bouloc P. The signal experiment in biorack-Escherichia coli in microgravity. *J. Biotech.*, 1996, **47**(2/3):89—97
- [15] Tipton C M. Animal models and their importance to human physiological responses in microgravity. *Med. Sci. Sports Exer.*, 1996, **28**(10):94—100
- [16] Vernikos J. Human physiology in space. *Bioessays*, 1996, **18**(12):1029—1037
- [17] Volkmann D, Tewinkel M. Gravisensitivity of cress roots —Investigations of threshold values under specific conditions of sensor physiology in microgravity. *Plant Cell Environ.*, 1996, **19**(10):1195—1202
- [18] Volkmann D, Tewinkel M. Gravisensitivity of cress roots under varying gravitational forces. *J. Biotech.*, 1996, **47**(2/3):253—259
- [19] Weisenseel M H, Meyer A J. Bioelectricity, gravity and plants. *Planta*, 1997, **203**:98—106

A REVIEW: NEW APPROACHES IN SPACE BIOLOGY (1996—1997)

I. THE MAIN INTERESTED POINTS AND RESULTS ON GRAVISENSING

LIU Yongding

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

Abstract

On the basis of a review on the newest documents including scientific papers and reports from 36 international periodicals, it indicated that 10 research directions about growth and development, metabolism, behavior, cell and tissue engineering, genetics and immunity, gravity sensing and transduction, population and eco-systems, methodology, application with organisms in space are well developed. The interested points of microgravity biology, space physiology, cell culture and tissue engineering, space exploitation and some details concerning gravisensing are summarized and present in this paper.

Key words Space biology, Research approaches, Gravity perception