

生命科学专论

生物再生生命保障系统

理论与技术

Theory and Technology of
Bioregenerative Life
Support System

等编著

刘红
I. I. Gitelzon
胡恩柱
胡大伟



科学出版社

www.sciencep.com

生命科学专论

生物再生生命保障系统 理论与技术

Theory and Technology of Bioregenerative Life
Support System

刘 红 I. I. Gitelzon 胡恩柱 胡大伟 等 编著

感谢科技部项目资助!

科 学 出 版 社

北 京

R852.8
L622

内 容 简 介

作者在多年研究积累的基础上,总结了本研究团队及其他国内外研究组在空间生物再生生命保障系统领域的研究结果,对生物再生生命保障系统的理论、关键技术进行了系统的论述和介绍,并对这些理论和技术在其他领域可能的应用进行了分析。全书共4部分、13章。第1部分(第1~3章)介绍BLSS的基本概念、基础理论以及分析、控制、优化等方面的内容。第2部分(第4~7章)介绍了生物再生生命保障系统的各项关键技术,包括微藻培养、植物栽培、废物处理和动物饲养。第3部分(第8~12章)对目前国内外的研究现状进行总结,详细介绍了一些著名的BLSS试验系统,包括俄罗斯的BIOS、美国的ALS、日本的CEEF及欧洲航天局的MELISSA等,同时对我国正在进行的多元共生生物系统研究进行了介绍。第4部分(第13章)讨论了BLSS技术在地面上的各种应用,包括在舰船等军事设施上的应用,以及在研究地球生物圈,解决农业、生态、环境等问题方面的应用。

本书不仅对从事空间生命保障系统的研究人员具有重要的参考价值,对于从事理论及实验生态学研究的人员同样具有重要的借鉴意义。本书可作为大专院校空间生命科学与生命保障的教科书或教学参考书,还可以作为生态学、空间生物学、环境科学及循环经济学等学科的教学和研究参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生物再生生命保障系统理论与技术/刘红等编著. —北京:科学出版社, 2009
(生命科学专论)

ISBN 978-7-03-026109-0

I. 生… II. 刘… III. 航天生保系统 IV. R852.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第216235号

责任编辑:莫结胜 刘 晶 / 责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年12月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—1 500 字数:415 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

人工控制的闭合生态系统的构建是一个新的研究领域。在该领域内，正在形成新思想、完善研究方法和定义新名词。

科学界越来越强烈地意识到，人类的技术对地球生物圈内物质循环的影响正日益增大，而且大部分是破坏性的，生物圈正在经历着人类活动带来的越来越显著的影响，因此，有充足的理由将我们这个时代视为生物圈进化的一个转折期，即从随机平衡过渡到受人类控制——由生物圈（Biosphere）进化到意识圈（Noosphere）。

这个植根于生物圈学新发展出来的学科分支被称为意识圈学（Noospherology），其中与人造意识圈的合成及其控制相关的部分可以被命名为 Noospherics。生物圈学和意识圈学的应用领域——人造生物圈的构成与控制、人造意识圈的构成与控制，其产生的成果及有望在未来产生成果的“花蕾”，将来可能在地面及空间得到应用。

本书中介绍的生物再生生命保障系统可以被看做是意识圈学的一个成果。从方法论的角度看，这一学科领域十分特殊。因为研究客体自身——受人类控制的闭合生态系统在自然界是不存在的，理想的绝对闭合的生物式物质循环可能实现不了，但是此问题的理论分析显示可以非常接近这种循环。在物质交换方面，受控系统的闭合度已经达到 80%~95%，但是食物链的充分闭合还有待实现。同时我们应该认识到，为实现此目标所前进的每一步都将带来越来越棘手的问题。

因此，近半个世纪以来，在创造出闭合生物圈（如生物系统）的道路上科学家已经走了很长的路。由 Myers（1954）完成的实验与 Priestley 的经典实验相似，在此实验中，一只老鼠被放在玻璃钟罩内，呼吸着藻类产生的氧气。在 Myers 的实验中老鼠死于窒息，此结果很不幸地重复了 Priestley 的著名实验的结果。但是，20 年后，人们在闭合的生物再生生命保障系统（BIOS-3）中可连续几个月生存、呼吸并进食。

我们认为在生物和物理/化学组合系统中，生物链环的主要功能是为人类提供可再生的产品，而物理/化学链环对循环生态系统内生物组成产生的不能循环的终产物的处理使之在返回循环上具有重要作用。

让我们看看地球上的悖论。地球资源是有限的，任何指定的时刻，空气中的氧气只能支持地球上的所有生物呼吸大约 2000 年，但是生命已经在我们的星球上繁衍了至少 4 亿年，同时也想不出有什么自然原因可能在未来终止生命的存在。生命的悖论即在于此，它的资源是有限的，但它本身是无尽的。只有从资源被重复利用的角度出发，才能对这个矛盾的问题进行合理的解释。也就是说，物质循环已经解决了此矛盾，并已经在进化过程中将所有生活在地球上的生物联系到了一起。正是物质循环形成了现代的“生物圈”概念。

在生物圈中，人类高速发展的工业活动给生态系统内物质闭合循环带来了严峻的考验。工业活动频繁与自然过程相冲突，而正是这些自然过程保证了生物圈自我维持持续的物质循环，没有它们，地球上的人类及所有生命是不可能存在的。在 21 世纪初，地球上生态的恶化，已经迫使人类去寻找一种途径来使人类社会的发展与自然相协调，人们提出了可持续发展的构想。与此同时，技术的高度发达，使人类活动扩展到太阳系中变得可以

实现。空间技术的发展已经解决了将人类送入太空的问题。但是，怎样支持人类在太空长达数月甚至数年的长期生活，使那些离开土生土长的地球的人们在空间继续生活下去？因为人类及所有生物和地球间好像被一个类似脐带的、进行物质交换的绳索连着。

乍看来，地球上的可持续发展问题与在空间支持人类生活的问题没有关系。但是，它们的科学和方法论基础是相同的。解决这两个问题的关键是实现物质循环的平衡。在地球生物圈中，需要解决的是如何维持物质循环；在空间居住地，必须创造出物质循环。尽管为空间环境设计的物质循环远远不是对地球生物圈的精确复制，但它们在功能上是相似的。

在 20 世纪的后半期，两个不同的科学发展路线，即生态学和空间生物学聚合在一起，同时一个新的研究领域——闭合人造生态系统出现了。这个新的领域也被定义为“Biospherics”，虽然此词还未被广泛接受。这个领域致力于两方面的研究：①为发现保证地球生态系统持续存在的机制而对闭合生态系统进行模拟；②开发能够维持人类远距离空间飞行，同时能够用于提高地面上那些不适合人类居住的环境条件的闭合人类生命保障系统。

在研究具有重要意义的地球生态系统持续存在的机制问题时，只使用观察法是不充分的，这些方法不能通过预测人类和生物圈之间相互作用的结果的方式来定义两者间所容许的互动界限。人类首次建立了一个意识圈学研究方向，即精确地描述可持续发展的策略。为了解决此问题，生物圈科学需要一种强有力的研究工具——实验。

20 世纪 70 年代，随着计算机科学的发展，一种研究生物圈的新方法应用到实际中，即建立了基于信息的代表生物圈及人为因素对其产生影响的范围数学模型，这种模型是由经验方法组织到一起的。没有人怀疑这样一种明智的想法，即避免将直接的实验性的研究成果用于改造或控制生物圈。生物圈的组成非常庞大，进行实验需要消耗无法估量的资金，同时更重要的是，改造或控制的结果对人类和生物圈自身都具有潜在的危险性和不可复原性。

数学模拟是不可取代的选择。依数学家的想法，这种模拟是一种可以用于预测生物圈中所发生的变化的唯一方法，尤其是导致人类对生物圈产生了巨大影响的变化。

个体标本、物种和生物群落对环境看上去非常小的变化（如一种污染物的出现、新物种的引入等）做出反应是生物圈内“生物”的特征。由于我们不知道生物圈内与很多参数有关的边界条件，所以我们不能预测哪种微小的变化起着关键的作用。也就是说，我们不能预测哪些小的变化会逐步增强到干扰生态系统稳态的程度。

传统的生态学几乎没有什么实验用于研究生物圈在物质及施加于物质的人为因素在物质交换中的作用，因此有必要在能够复制生物圈特性——物质循环闭合性的条件下进行特殊的“生物圈”的实验。为此，需要复制一个闭合的物质循环系统——闭合生态系统，它也将成为对非稳定和灾难性的生物圈状态进行模拟的基础。

但是，从本质上讲，至少在我们的地球上，只有生物圈这个生态系统可以被定义为真正的闭合。人类可以人工创造一个相似的客体吗？解决这个问题的方法可能是对我们所掌握的生态知识的完整性的检验。

早在 19 世纪末，K. E. Tsiolkovsky 就已经在设计一个能在太空维持人类生命的生物再生生命保障系统，但是详细的科学描述和实验研究是在 20 世纪 50 年代人类开始急切向空间拓展时才开始的。

自 20 世纪 50 年代开始实验研究如何建立有人居住的闭合生态系统以来，其在前苏

联、美国、日本、德国、英国和中国有不同程度的发展。在自然生物圈外建立人类生命保障系统，人们自己控制其作为其中一个生物组成的闭合人造生态系统中的物质循环。研究表明，与不受任何人控制的生物圈相反，一个小的闭合生态系统只有在人为控制下才能维持运转。

这些研究不仅有利于解决空间生命保障问题，还将对解决全球生物圈问题起到基础性的重要作用。

人造闭合生态系统的创造，使我们以类似放大镜的方式做到：①逼近环境中微弱的变化所引起的“蝴蝶效应”；②阐明物质循环中稳态波动的微妙机制；③预测系统可能的特征和进化。这种物理模型实验代表了研究生物圈的新方法。

闭合系统的建立不同于开放系统。闭合系统是由一小部分物种（至少是两种）人工构成的。在理想情况下，这些物种可能是“还原剂—氧化剂”、“光合自养—异养”，等等。系统内所包含的物种的组织水平越低，它们对周围环境的要求越原始，我们准确了解它们的物质和能量交换的概率越大，我们就能更加靠近一个完全闭合的人造生态系统。例如，闭合微生态系统能够作为研究微生物生态学、评价辐射和各种物理场对生态系统造成的影响，以及研究生物群落与微生态系统进化的工具。

因此，一个闭合的人造生态系统更像是一个意识圈的模型，而不是生物圈模型。我们可以研究并描述一种用来控制意识圈中人类的作用的算法，这种作用同生物圈进化的开始阶段时人类必须承担的一样。人对闭合人造生态系统的控制可以作为以后对地球生物圈进行控制的一个范例。

一个基于生物再生式物质循环的生命保障系统是完全可以实现的，它能够帮助人类在不威胁太阳系内其他星体的前提下，通过向其输入地球上的物质和一些反应来使外太空适于人类居住。这样的话，人类将只需要少量的物质输入就能够在外太空生存，同时不把代谢产物释放到周围环境中去。

对于地球上的一些特殊地区，如北极、南极、沙漠和高山，调节大气、水和蔬菜营养的部分闭合的技术能够大幅度提高这些极端地区的生活质量。闭合生命保障技术的另一个用途是，它们能将由人类及其所饲养的家禽动物产生的废物等造成的环境污染所带来的影响最小化。这些技术在人类居住在火星或月球基地前在地球上付诸实践是完全可能的。向完全闭合的、非污染性的、没有死物质存在的生命保障技术的转变是迈向意识圈的可持续发展道路上的重要一步。

本书致力于研究的生物再生生命保障系统理论和实践问题，不仅对人类进军太空具有重要意义，更与地面上活生生的自然界紧密相关，需要越来越多的科学家投身其中。希望本书能起到抛砖引玉的作用。

刘红教授和 I. I. Gitelzon 院士（俄罗斯科学院）担任了本书的主编，刘红教授课题组成员胡恩柱、胡大伟、支银芳、佟玲、闫敏、杨素玲、付玉明、于晓辉、李明、徐春晓等参加了本书的编著。

刘红 I. I. Gitelzon 等

2009 年 1 月

目 录

前言

第 1 部分 生物再生生命保障系统概论	1
1 绪论	1
1.1 生物再生生命保障系统的组成和基本功能	1
1.2 生命保障系统的发展	4
参考文献	5
2 生物再生生命保障系统设计的理论基础	6
2.1 营养需求	6
2.2 生物部件筛选原则	18
2.3 生物再生生命保障系统的基本构型	24
2.4 物质流动关系	26
参考文献	28
3 生物再生式生命保障系统的分析、控制与优化	31
3.1 系统分析与过程假定	32
3.2 系统的优化	35
3.3 子系统的建模、分析、优化与控制	40
3.4 系统的分析与优化适用的软件平台	62
参考文献	62
第 2 部分 生物再生生命保障系统的关键技术	65
4 藻类培养技术	65
4.1 微藻的连续培养技术	66
4.2 微藻在生物再生生命保障系统中的功能	74
参考文献	79
5 植物栽培技术	80
5.1 植物生长条件的优化	80
5.2 植物的营养特性	90
5.3 植物的连续培养	92
5.4 光合作用与蒸腾作用	95
5.5 空间植物栽培装置	96
参考文献	101
6 废物处理技术	105
6.1 植物不可食生物量处理及循环利用	105
6.2 人体排泄物处理及循环利用	123
参考文献	139
7 动物蛋白生产技术	142
7.1 蚕的饲养	142

7.2	鱼类饲养	154
7.3	两栖类动物饲养	158
7.4	其他空间动物	159
7.5	未来空间动物蛋白研究的发展方向	161
	参考文献	161
第3部分	生物再生生命保障系统综合实验装置	164
8	俄罗斯: BIOS	164
8.1	BIOS-1——“人-微藻”二环系统	164
8.2	BIOS-2——“人-微藻-高等植物”三环系统	170
8.3	BIOS-2——“人-微藻-高等植物-微生物”四环系统	172
8.4	BIOS-3——综合实验系统	174
8.5	BIOS 系统展望	178
	参考文献	180
9	美国: ALS	182
9.1	生物圈 2 号 (Biosphere-2)	183
9.2	ALS 计划试验模拟项目	190
9.3	Bio-Plex 综合试验装置	191
	参考文献	195
10	日本: CEEF	197
10.1	CEEF 构成及其功能	197
10.2	CEEF 系统实验	203
	参考文献	209
11	欧洲: MELiSSA	211
11.1	单元和系统的设计	211
11.2	MELiSSA 的组成及物质传递	214
11.3	MELiSSA 计划的 5 个阶段	216
11.4	MELiSSA 单元和系统实验	218
	参考文献	228
12	中国: MBioLiSS	230
12.1	MBioLiSS 构型设计	230
12.2	动植物单元间关系实验	244
12.3	植物-动物-藻多元生物联合实验系统	251
12.4	展望	253
	参考文献	254
第4部分	BLSS 技术的地面应用	258
13	生物再生生命保障技术在陆地上的可能应用	258
13.1	在远航舰艇等军事设施中的应用	258
13.2	在解决地面农业问题中的应用	259
13.3	在解决环境及能源问题方面的应用	261
	参考文献	263
	结论与展望	265
	缩写	269

Contents

Preface

Part I INTRODUCTION TO BIOREGENERATIVE LIFE SUPPORT SYSTEM	1
1 Exordium	1
1.1 Compositions and Basic Functions of Bioregenerative Life Support System	1
1.2 Development of Life Support System	4
Reference	5
2 Theoretical Basis of Bioregenerative Life Support System Design	6
2.1 Nutritional Requirement	6
2.2 Screening Principles of Biological Components	18
2.3 Basic Configurations of Bioregenerative Life Support System	24
2.4 Mass Flows	26
Reference	28
3 Analysis, Control and Optimization of Bioregenerative Life Support System	31
3.1 System Analysis and Process Assumption	32
3.2 System Optimization	35
3.3 Modeling, Analysis, Optimization and Control of Subsystems	40
3.4 Software Platform for System Analysis and Optimization	62
Reference	62
Part II KEY TECHNOLOGIES OF BIOREGENERATIVE LIFE SUPPORT SYSTEM	
	65
4 Microalgae Cultivation Technology	65
4.1 Continuous Cultivation of Microalgae	66
4.2 Functions of Microalgae in Bioregenerative Life Support System	74
Reference	79
5 Plants Cultivation Technology	80
5.1 Optimization of Cultivation Conditions	80
5.2 Nutritional Properties of Plants	90
5.3 Continuous Cultivation of Plants	92
5.4 Photosynthesis and Transpiration	95
5.5 Space Plant Cultivation Facility	96
Reference	101
6 Waste Treatment Technology	105
6.1 Treatment and Recycling of Plant Inedible Biomass	105
6.2 Treatment and Recycling of Human Excrement	123
Reference	139
7 Animal-Protein Production Technology	142
7.1 Silkworm Feeding	142

7.2	Fish Breeding	154
7.3	Amphibian breeding	158
7.4	Other Space Animal Candidates	159
7.5	Prospective Development on Space Animal-Protein Research	161
	Reference	161
Part III COMPREHENSIVE EXPERIMENTAL FACILITIES OF BIOREGENERATIVE LIFE SUPPORT SYSTEM		164
8	Russia: BIOS	164
8.1	BIOS-1: "Human-Microalgae" Configuration	164
8.2	BIOS-2: "Human-Microalgae-Higher Plant" Configuration	170
8.3	BIOS-2: "Human-Microalgae-Higher Plant-Microorganism" Configuration	172
8.4	BIOS-3: Comprehensive Experimental System	174
8.5	Prospective Development of the BIOS Project	178
	Reference	180
9	USA: ALS	182
9.1	Biosphere-2	183
9.2	Advanced Life Support Project	190
9.3	Bio-Plex	191
	Reference	195
10	Japan: CEEF	197
10.1	Compartments and Functions	197
10.2	Integrated Experiment	203
	Reference	209
11	Europe: MELiSSA	211
11.1	Compartments and System Design	211
11.2	System Configuration and Mass Flows	214
11.3	Five Phases	216
11.4	MELiSSA Pilot Plant	218
	Reference	228
12	China: MBioLiSS	230
12.1	Configuration Design	230
12.2	"Plant-Animal" Experiment	244
12.3	"Plant-Animal-Microalgae" Experiment	251
12.4	Prospects	253
	Reference	254
Part IV APPLICATION OF BLSS TECHNOLOGY ON THE GROUND		258
13	Possible Application of BLSS Technology On the Ground	258
13.1	Applications on the Naval Vessels for long distance voyages	258
13.2	Application on the Terrestrial Agriculture	259
13.3	Application on Environment Protection and Energy Saving	261
	Reference	263
Conclusion and Prospects		265
Acronyms & Abbreviations		269

第 1 部分 生物再生生命保障 系统概论

1 绪 论

在载人航天刚刚起步的 20 世纪 60 年代初, 美国和前苏联的生命保障技术专家和生物学家就开始了对生物再生生命保障系统 (Bioregenerative Life Support System, BLSS) 的探索。他们清楚地认识到, 载人航天的目标不只是近地轨道上的短期飞行, 还有月球基地、火星基地和更加遥远的外太空, 要实现这些目标, 必须依靠 BLSS 技术 (Abe et al., 2005; Velayudhan et al., 1995; Schwartzkopf, 1992)。

BLSS 是利用高等植物和微生物等来生产食物、处理废物, 同时再生空气和水, 为航天员生命活动提供物质保障的独立、完整、复杂的系统 (Radmer et al., 2003)。它是在物理/化学的非再生式和再生式环境控制与生命保障系统 (Environmental Control and Life Support System, ECLSS) 的基础上, 引入生态平衡概念和生物技术, 力图创造工程控制技术和生物技术相结合的人工小型生态环境, 实现在一定的密闭空间内人和其他生物之间氧气、水分和有机物的循环再生, 从而大大减少长期空间活动的地面补给, 降低运行成本, 并为航天员创造一个更为舒适和安全的生活环境。

1.1 生物再生生命保障系统的组成和基本功能

1.1.1 系统组成

BLSS 在结构上主要由两部分构成: 一部分是以高等植物和微藻为代表的自养单元; 另一部分是由人、动物、微生物等组成的异养单元。其中前者是 BLSS 最主要的功能部件, 也是其区别于其他类型生保系统的重要标志。

除了提供必要的消耗性物资和将废物处理后再循环之外, BLSS 还必须为航天员提供适宜的环境条件, 温度、湿度、噪声、通风和微量污染物的浓度都必须控制在一定范围内。根据功能的不同, 可以将 BLSS 分为如下几个部分。①大气管理单元——CO₂ 去除, O₂ 产生和供应, 微量污染物监测和控制, 大气成分监测和控制, 压力监测和控制, 温、湿度控制, 火灾预防和抑制, 通风。②水管理单元——水储藏和分配, 水再生, 水质监测。③废物处理单元——废物收集和储存, 代谢废物处理 (尿、粪便), 其他废物处理。④食物供给单元——包括生物量生产和食物加工。

在环境控制方面可以依靠各种物理/化学设备, 但是在物质循环方面, 尤其是食物供

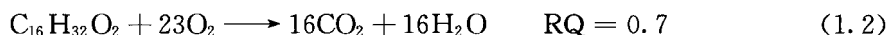
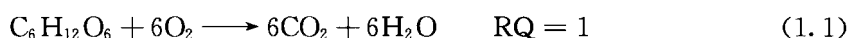
给方面则必须依靠生物技术。因此, BLSS 与传统的物理/化学系统既相互联系, 又有所区别。物理/化学系统具有处理效率高、易控制等特点, 主要是用来保障航天员的生命安全; 而 BLSS 技术处理时间一般比较长, 可控性不如物理/化学系统, 其正常工作是建立在航天员安全、健康的基础之上的。另外, BLSS 在心理调节和物质供应等方面具有独特的优势, 它可以提供一个比物理/化学系统更适宜人类生活的类似于地球的生态环境。BLSS 还可生产新鲜水果和蔬菜, 培养动物, 使饮食多样化并更加可口。BLSS 可以提供人体必需的所有营养组分, 几乎不需要再从外界供应, 尽管还需从外部定期补充少量植物生长的矿物质和某些生物种子, 然而其需求显著地低于物理/化学系统。综上所述, BLSS 技术是以生物技术为核心的高级生命保障系统 (Advanced Life Support System)。

1.1.2 氧气再生

航天员的新陈代谢过程需要不断地消耗 O_2 , 产生 CO_2 , 绿色植物或具有光合作用功能的藻类则利用 CO_2 进行光合作用, 重新转化为 O_2 , 这些自养生物是天然的 O_2 再生系统。 O_2 和 CO_2 在自养、异养两组分之间的传递必须保持平衡, 才能保持系统中空气成分的稳定。这种气体交换过程的平衡主要由航天员的呼吸商 (Respiratory Quotient, RQ) 和自养生物的同化商 (Assimilation Quotient, AQ) 决定。

AQ 与 RQ 用公式来表示都是 CO_2/O_2 , 但是符号所表示的意义却不相同。前者是指自养生物在单位时间内吸收 CO_2 的量与放出 O_2 的量的比, 后者则是指人在单位时间内产生 CO_2 的量与消耗 O_2 的量的比 (Gitelson et al., 1996)。

RQ 通常随饮食成分的不同而发生变化。对于糖类的消化过程来说, 其 RQ 等于 1.0 [式 (1.1)]。而对于脂肪来说, 其结构中含有较少的氧原子, 因此消化过程需要消耗更多的氧气。以软脂酸为例, 其 RQ 只有 0.7 [式 (1.2)]。由于蛋白质在体内氧化不完全, 而且氧化分解的细节尚不够明了, 通过蛋白质分子中的碳和氢被氧化时的需氧量和 CO_2 产生量来近似估算, 其 RQ 为 0.80~0.85。



俄罗斯 BIOS-3 实验证明, 在以素食为主的情况下, 平均 RQ 约为 0.9 (Gitelson et al., 1996)。美国宇航局 (NASA) 的研究结果显示每位航天员平均每天需要 O_2 约 835 g (约合 26.09 mol), 产生 CO_2 约 998 g (约合 22.68 mol), 其 RQ 约为 0.869 (Hanford, 2004)。中国居民混合膳食的平均 RQ 约为 0.85 (范少光等, 2000)。

对于大多数植物而言, 由于葡萄糖是其光合作用的主要产物, 因此 AQ 通常都接近于 1.0。一些油料作物, 如花生、大豆, 具有较低的 AQ 值, 即它们在生长过程中释放了更多的 O_2 , 吸收了更多的 CO_2 。藻类的 AQ 为 0.7~0.85。

RQ 依赖于饮食成分, AQ 则依赖于自养生物的组成, 二者都不是固定不变的, 只有通过合理调节使 RQ 与 AQ 相等, 气体交换才能达到平衡。调节的方法有很多, 如改变航天员的食谱组成或是调节绿色植物的种植结构, 这两种方法响应时间都比较长, 前者约需 10 d 左右; 而后者受植物生长周期的限制, 需要 30~60 d。一般情况下可以利用藻类或物理/化学设备进行空气成分的快速调节。

1.1.3 食物生产

BLSS 的另一个重要功能是为航天员提供食物,包括人体所需的全部热量、矿物质和维生素。根据美、俄载人航天观测的资料,执行短期航天任务、体重 70 kg 左右的男航天员在舱内生活,每天的能耗不超过 2 500 kcal (相当于地面成年男子轻体力劳动的能耗水平) (Tikhomirov et al., 2003)。考虑食物残留和利用效率(除去粪尿的能量),一般在能量需求量的基础上增加 10% 作为航天口粮的能量供应标准,例如,按能耗 2 500 kcal 计,则供给量应为 2 750~2 875 kcal (Perchonok et al., 2002)。

不同系统对营养物质的需求量也不相同。对于完全采用素食的系统,仅仅依靠绿色植物就足以满足乘员所需的糖类、脂肪、蛋白质及各种维生素和微量元素。参考《中国居民膳食营养素参考摄入量(Chinese DRI)》(中国营养学会,2000),糖类、蛋白质和脂肪的摄入量应分别占食物总能量的 52%~55%、12%~15% 和 30%。但是对于执行长期任务的航天员来说,完全素食是不利于身体健康的,必需摄入一定量的动物性食品,这部分食品的来源视实际情况而定,如果消耗量比较小,可以预先储存在系统中,并定期从地面补充;如果消耗量比较大,则应着力开发在系统内养殖动物的技术,最大限度地使系统实现自给自足。

1.1.4 废物处理和再生

BLSS 中的废物主要可以分为两大类:一类是植物不可食生物量,又称植物残渣,主要由纤维素、半纤维素、木质素和少量的蜡质构成;另一类是人体新陈代谢过程产生的粪便、代谢废水(呼出的湿气、汗水、尿液和粪便中的水分等),以及日常生活中产生的厨余、食物残渣和卫生废水(包括洗脸、洗澡、洗衣及个人卫生废水)等。

传统的环控生保系统主要采用物理/化学方法对废水进行再生,尽管效率很高,但是设备复杂、能耗大。在 BLSS 中,水的深度净化则主要依靠高等植物的蒸腾作用进行。通常情况下,植物每产生 1 kg 干生物量可蒸发 200~1 000 L 水 (Schwartzkopf, 1992)。这些水汽经冷凝收集和紫外杀菌后可作为卫生用水,其中一部分再经离子交换、活性炭吸附、消毒和补充微量元素,便可用做饮用水和食品加工用水 (王普秀等, 2003)。

系统内水的循环是依靠生物机制自动调节的。以人体水代谢过程为例,通常人体摄入量(饮用水和食品中的水分)小于排水量,这是因为食物摄入到人体以后发生氧化代谢,产生一定量的水,如式 (1.2) 所示。摄入量加上生理代谢产水量,其数值与生理排泄水量相等,从而维持人体的水代谢平衡。对于高等植物来说,该过程正好相反,如式 (1.1) 所示。

系统内水的消耗过程并不是连续的,而蒸腾作用则无时无刻不在进行,需要设立适当容积的水箱用于水的储藏。此外,受目前工艺条件的限制,必然有一部分水会随着固体废物一起排出系统,因此必须定期向系统内补充水分才能维持系统的水平衡。

绿色植物不仅可以再生废水,同时它还具有处理固体和气体废物的能力。以植物残渣和人体代谢垃圾为主体的固体废物中含有大量可溶性的微量元素,采用生物或者物理/化学工艺对其进行加工处理,转化成可被植物吸收利用的有效状态,进而可用于施肥 (Velayudhan et al., 1995)。

1.2 生活保障系统的发展

1961年4月21号, Yuri Gagarin 作为第一名进入外太空的航天员, 在轨道上飞行了108 min, 鉴于飞行时间很短, 他所乘坐的“东方号 (Vostok)”飞船当时配备的生命保障系统只包括空气再生装置, 以及温、湿度控制装置。当时只能通过舱体内的一些设备来提供生命保障, 航天员还必须穿上厚重的航天服。在“东方号”的继任者“日出号” (Voskhod) 上, 航天员已经无需再利用航天服进行压力防护了。

“联盟号 (Soyuz)”飞船上采用的是更为先进的生保系统, 其设计容量可以为3名航天员提供7 d 生命保障。它采用 LiOH 吸收 CO_2 , 同时利用预先储藏的 KO_2 制造氧气; 微量污染物采用活性炭和生物过滤器进行处理; 温、湿度的控制采用带有水分离设施的冷凝热交换装置; 水和食物需要预先储藏在系统中。该生保系统非常成功, 因此, 这种形式的生保系统至今都应用在往返于国际空间站 (International Space Station, ISS) 的飞船和航天飞机上。

第一个空间站是前苏联的“礼炮号 (Salyut)”系列。早期的“礼炮1”至“礼炮5”空间站所采用的生保系统都同“联盟号”类似, 从“礼炮6”开始, 系统引入了冷凝水和生活废水再生装置, 以实现水的部分循环。

“和平号 (Mir)”是到目前为止运行时间最长的轨道空间站, 它于1986年发射, 设计乘员数为6人。“和平号”空间站的生保系统是以“礼炮号”空间站的生保系统为基础, 在某些方面进行了升级, 其最重要的一点是加入了水电解装置, 对尿液进行处理并电解制造氧气, 以代替不可再生的 KO_2 。此外用分子筛 (Vozdukh) 替换了 LiOH 二氧化碳收集装置, 将收集的 CO_2 碳排出舱外。

美国第一个载人飞船系列——“水星号” (Mercury) 由数个独立的舱室组成。空气再生主要由航天服来完成, 生保系统舱则主要提供温度、通风控制及食物储备。在此后的“双子座 (Gemini)”系统中大多保持着与“水星号”相似的生保技术, 唯一不同的是采用超临界气体储存技术代替了加压储存。

在“阿波罗 (Apollo)”计划的实施中采用了不同的生保技术。系统所需要的水不再由储备舱提供, 而是由燃料电池的副产物来提供, 尿液被直接排到舱外, 水循环是不封闭的。系统的空气成分在这期间也发生了变化。在“阿波罗”飞船中, 最初的大气是由纯氧在低压条件下构成, 这一参数在“阿波罗1号”后发生了调整。最后, 阿波罗舱室中的大气成分被设置为60%的 O_2 和40%的 N_2 , 但是航天服中的 O_2 浓度仍然是100%。

与“阿波罗”飞船类似, 美国的第一个空间站——“天空实验室 (Skylab)”采用的也是 N_2/O_2 混合型的大气, 引入双床分子筛来替代 LiOH。

航天飞机中采用的是地球标准海平面大气成分和气压, 设计乘员数为7人。其中一些航天飞机的水管理子系统采用了“阿波罗”的燃料电池技术来处理废水, 并采用了微生物止回阀, 此外, 还利用便桶来收集粪便。

目前的国际空间站上已经可以为航天员提供足够的安全保障。虽然国际空间站是一个高度复杂的基地, 但是其生活保障系统远没有达到封闭——其废物处理只是单纯的收集储存, 并在航天飞机返回的过程中焚烧; 水循环也不是闭合的, 它利用航天飞机对水进行补给。空间站的氧供应通过电解废水来提供, CO_2 是采用分子筛进行收集并排出系统, 此

外废水电解产生的氢也排至舱外。

为了保障航天员的健康,除了提供适宜的温度、湿度、气压等环境条件外,还必须提供充足的氧气、水和食物。随着技术的进步,人们已经实现了利用物理/化学设备对氧气和水进行再生,但是食物却始终无法自给自足。对于近地轨道的空间任务来说,都是将食物预先储存在系统中,并将尿液、粪便等代谢废物和生活垃圾排出系统。但是当任务时间较长或是距离较远时(如月球/火星基地),就目前的火箭发射容量而言,“储存倾卸”的方式是不适宜的,必须开发系统内的食物生产技术,并对废物进行回收和再生,提高物质循环的闭合程度。俄罗斯、美国、日本及欧洲航天局都在积极开展这方面的研究。他们投入了大量的人力、物力和财力,先后建造了大型综合实验装置,如俄罗斯(前苏联)的 BIOS、美国的 Bio-Plex、日本的 CEEF 和欧洲航天局的 MELISSA 等(Morowitz et al., 2005; Ashida 2003; Nitta et al., 2000, Salisbury et al., 1997)。

2004 年 1 月 14 日美国总统布什在美国宇航局(NASA)总部发表讲话,宣布美国航天员最早于 2015 年重返月球建立基地,并以此为跳板,把人类送上火星乃至更遥远的宇宙空间。随着“嫦娥一号”和“月亮女神”的发射,包括中国在内的越来越多的国家参与到“探月”的浪潮之中。俄罗斯、美国和欧洲已经将目光锁定在了与地球毗邻的火星,先后发射了多台火星探测器,传回了大量图片和数据,并且证实了火星表面的确有水的存在。各国都在积极开展登陆火星的研究,其中最重要的一项技术就是 BLSS。相信在不久的将来,人类将站在火星的土地上。

参 考 文 献

- 范少光,杨浩,潘伟丰. 2000. 人体生理学. 北京:北京医科大学出版社. 221~222
- 王普秀,郑传先. 2003. 航天环境控制与生命保障工程基础. 北京:国防工业出版社. 46~47
- 中国营养学会. 2000. 中国居民膳食营养素参考摄入量(Chinese DRI). 北京:中国轻工业出版社
- Abe K, Ishikawa Y, Kibe S, et al. 2005. Simulation model for the closed plant experiment facility of CEEF. *Advances in Space Research*, 35 (9): 1597~1608
- Ashida A. 2003. Considerations of design for life support systems. *Advances in Space Research*, 31 (7): 1805~1809
- Gitelson J I, Okladnikov Y N. 1996. Consistency of gas exchange of man and plants in a closed ecological system: lines of attack on the problem. *Advances in Space Research*, 18 (1~2): 205~210
- Hanford A J. 2004. Advanced life support baseline values and assumptions document. NASA/CR-2004-208941, Houston, Texas: Johnson Space Center, NASA
- Morowitz H, Allen J P, Nelson M, et al. 2005. Closure as a scientific concept and its application to ecosystem ecology and the science of the biosphere. *Advances in Space Research*, 36 (7): 1305~1311
- Nitta K, Otsubo K, Ashida A. 2000. Integration test project of CEEF - A test bed for closed ecological life support systems. *Advances in Space Research*, 26 (2): 335~338
- Perchonok M, Bourland C. 2002. NASA food systems: past, present, and future. *Nutrition*, 18 (10): 913~920
- Radmer R, Behrens P, Arnett K, et al. 2003. Algal culture studies for CELSS. NASA-CR-177448, NASA Center for AeroSpace Information (CASI)
- Salisbury F B, Gitelson J I, Lisovsky G M. 1997. Bios-3: siberian experiments in bioregenerative life support. *Bioscience*, 47 (9): 575~585
- Schwartzkopf S H. 1992. Design of a controlled ecological life support system. *Bioscience*, 42 (7): 526~535
- Tikhomirov A A, Ushakova S A, Gribovskaya I A, et al. 2003. Light intensity and production parameters of phytocenoses cultivated on soil-like substrate under controlled environment conditions. *Advances in Space Research*, 31 (7): 1775~1780
- Velayudhan A, Karen L K, Westgate P J, et al. 1995. Analysis of plant harvest indices for bioregenerative life support systems. *Enzyme and Microbial Technology*, 17 (10): 907~910

2 生物再生生命保障系统设计的理论基础

本章从 BLSS 中人的营养需求和代谢活动出发,分析系统各个单元之间的物质交换关系,从而对系统的原理进行概括性介绍。BLSS 的核心是生物技术,但并不是所有的生物技术都适用于空间环境。本章介绍了生物物种的筛选原则和在此基础上设计的几种系统构型。

2.1 营养需求

BLSS 研究的首要目标是确定航天员在空间环境中的营养需求,并据此建立航天员的食谱,进而确定 BLSS 的构成。航天员在执行空间任务期间所需的能量和各种营养元素的量,可以参考地面膳食营养推荐摄入量 (Dietary Reference Intake, DRI) 和空间实验研究的结果加以确定。

2.1.1 能量

能量 (Energy) 需要量是指能长期保持良好的健康状况,具有良好的体型、机体构成和活动水平的个体,达到能量平衡并能满足其从事生产劳动和社会活动所必需摄入的能量。

长期的膳食能量摄入水平可通过体质指数 (Body Mass Index, BMI) 进行评价。世界卫生组织 (World Healthy Organization, WHO) 建议 $18.5 \sim 24.9 \text{ kg/m}^2$ 的 BMI 是一般可以接受的水平;对于一个群体而言,推荐的 BMI 为 21.0 (中国营养学会, 2000)。

$$\text{BMI} = \frac{\text{体重}}{\text{身高}^2} \quad (2.1)$$

能量消耗量是确定能量需求量的基础。能量消耗主要包括基础代谢 (Basal Metabolism)、食物的代谢反应 (Metabolic Response to Food)、体力活动 (Physical Activity) 和生长发育 (Growth) 等。总能量消耗 (Total Energy Expenditure, TEE) 的测量方法主要有双标水 (Double Label Water, DLW)、活动时间记录法、要因估算法 (Factorial Estimation)、热量计法、心率监查法等。对于成人来说, TEE 的大小相当于其能量需求。

航天员在执行空间任务过程中的能量需求至少与在地面时的情况相同,并且随着任务时间的延长,能量需求有上升的趋势 (Lyndon, 2002; Nicogossian et al., 1982; Rambaut et al., 1977)。美、俄航天员的能量推荐摄入量都是参考 FAO/WHO/UNU 联合专家委员会的基本准则,采用经常性 TEE 要因估算法进行确定的。

$$\text{TEE} = \text{BMR} \times \text{PAL} \quad (2.2)$$

式中, BMR (Basal Metabolism Rate), 基础代谢率; PAL (Physical Activity Level), 体力活动水平。

根据美、俄资料,航天员的平均年龄约为 34 岁,因此, BMR 和 PAL 通常按照 WHO 推荐的 30~60 岁成人中等劳动强度的能量方程进行估算。