

上海海事大学学术著作出版基金资助

利用螺旋藻实现尿液的 闭合回用和氧气再生

冯道伦 宿鹏浩 著



上海浦江教育出版社

上海海事大学学术著作出版基金资助

利用螺旋藻实现尿液的 闭合回用和氧气再生

冯道伦 宿鹏浩 著



 上海浦江教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

利用螺旋藻实现尿液的闭合回用和氧气再生/冯道伦,宿鹏浩著. —上海:上海浦江教育出版社有限公司,2014.4

ISBN 978-7-81121-331-7

I. ①利… II. ①冯… ②宿… III. ①螺旋藻属—应用—人体—尿—排泄—废物综合利用—研究 IV. ①R334 ②X799 ③Q949.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 038902 号

上海浦江教育出版社出版

社址:上海海港大道 1550 号上海海事大学校内 邮政编码:201306
电话:(021)38284910(12)(发行) 38284923(总编室) 38284910(传真)

E-mail: cbs@shmtu.edu.cn URL: <http://www.pujiangpress.cn>

上海双宁印刷有限公司印装 上海浦江教育出版社发行

幅面尺寸:169 mm×239 mm 印张:8.5 字数:152 千字

2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑:黄丽芬 封面设计:赵宏义

定价:36.00 元

伴随着全球经济的发展,污染物的无组织排放也越来越多,导致全球很多国家,特别是发展中国家的环境质量急剧恶化。同时,伴随着全球人口快速增长,日益增长的人体排泄物——尿液的产生和排放量也快速增加。尿液中大量的氮(N)和磷(P),恰恰是导致水体富营养化的根本原因。工农业生产要消耗大量的化石燃料,产生大量的 CO_2 ,这已经被大部分科学家认为是导致全球气候变暖的重要原因。另外,在一个密闭空间中,人体生命活动亦会产生 N 、 P 、 CO_2 ,并消耗大量的 O_2 。

本书的研究是基于密闭空间,通过向密闭空间引入生物部件,实现密闭空间中主要营养元素(C、O、N和P等)的较高闭合度循环,为未来远距离的地外飞行,在深海、极地或者外太空建立长期有人居住的基地提供支撑。具体包括:将人体生命活动所产生的各种废物转化为密闭空间乘员直接或者间接的食物来源;吸收 CO_2 ,再生 O_2 ,维持一个适宜密闭空间乘员活动的大气环境。当然,本书的研究成果一方面完全可以移植到地球表面的开放系统中,减少N和P排放,避免水体富营养化;另一方面,该过程可以吸收、减排 CO_2 ,而且若将获取的藻生物量用于制取生物燃料,可以实现C源的部分闭合循环,这两者都有助于解决全球变暖问题。

1	绪论	1
1.1	生活保障系统	2
1.2	物/化再生式生活保障系统	3
1.2.1	大气控制与供应	4
1.2.2	大气再生	4
1.2.3	水回收与管理	5
1.2.4	其他	6
1.3	受控生态生活保障系统	6
1.3.1	俄罗斯和 BIOS-3	7
1.3.2	美国和生物圈 II 号	10
1.4	螺旋藻概论	13
1.4.1	螺旋藻的生物学特征	13
1.4.2	螺旋藻的营养	14
1.4.3	螺旋藻的毒理学	17
1.4.4	螺旋藻在生活保障系统中的应用	18
1.5	研究内容和目的	21
	参考文献	23
2	螺旋藻在未处理尿液中的培养	31
2.1	藻种、培养基和光源	31
2.2	光生物反应器	32
2.3	分析方法	33
2.3.1	生物量浓度	33

2.3.2 线性生长速率(v)	34
2.3.3 最大生物量浓度($P_{\max}$)	34
2.3.4 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	34
2.3.5 pH 值	35
2.3.6 光强度	35
2.3.7 蛋白质	35
2.3.8 脂肪	35
2.3.9 金属含量	36
2.3.10 水分	36
2.3.11 干重	36
2.3.12 灰分	36
2.3.13 叶绿素含量	36
2.4 螺旋藻在尿液中的培养	37
2.5 稀释倍数的影响	39
2.6 光强的影响	40
2.7 光照时间的影响	42
2.8 曝气速率的影响	43
2.9 温度的影响	44
2.10 不同接种量的影响	45
2.11 N 源间歇投加培养螺旋藻	46
2.12 螺旋藻的主要组分	48
2.13 本章小结	49
参考文献	49

3 营养组分对螺旋藻生长的影响

54

3.1 分析方法	54
3.1.1 $\text{NO}_3^- - \text{N}$	54
3.1.2 TN	55
3.1.3 螺旋藻吸收光谱	55
3.2 N 源对螺旋藻生长的影响	56
3.2.1 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对螺旋藻生长的影响	56
3.2.2 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 对螺旋藻生长的影响	58

3.2.3 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量对螺旋藻生长的影响	59
3.3 有机物对螺旋藻生长的影响	61
3.4 微量元素对螺旋藻生长的影响	62
3.5 螺旋藻培养时 pH 值的变化	64
3.6 本章小结	66
参考文献	67

4

光生物反应器中的光强分布模型

70

4.1 平行光源的光衰减实验	71
4.2 内置光源的光衰减实验	72
4.3 平行光源照射时的光强分布	72
4.4 内置线光源照射时的光强分布	74
4.4.1 单光源	75
4.4.2 对称四光源	79
4.5 螺旋藻的生长动力学模型	81
4.6 本章小结	85
参考文献	86

5

尿液的硝化

90

5.1 尿液硝化影响因素	92
5.1.1 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度和负荷	92
5.1.2 DO 浓度	92
5.1.3 pH 值	93
5.1.4 抑制剂	93
5.2 尿液完全硝化控制策略	93
5.3 硝化反应器	94
5.4 硝化培养基的硝化	95
5.5 尿液的硝化	96
5.6 pH 值和 DO 浓度对尿液硝化的影响	99
5.7 尿液硝化历程	101
5.8 硝化尿液中螺旋藻的培养结果	103
5.9 本章小结	105

参考文献	105
------	-----

6 尿液中螺旋藻的吸收 CO_2 和释放 O_2 行为 112

6.1 螺旋藻吸收 CO_2 和释放 O_2 的实验	112
6.1.1 螺旋藻吸收 CO_2 的实验	112
6.1.2 螺旋藻释放 O_2 的实验	113
6.1.3 密闭体系中螺旋藻吸收 CO_2 和释放 O_2 的实验	113
6.2 痕量挥发性有机物的固相微萃取检测	114
6.3 螺旋藻吸收 CO_2 的研究	115
6.4 螺旋藻释放 O_2 的研究	115
6.5 密闭体系中螺旋藻吸收 CO_2 和释放 O_2 的研究	116
6.6 密闭体系中的痕量挥发性有机物	118
6.7 理论循环率	120
6.8 本章小结	122
参考文献	123

7 结论和未来工作展望 125

7.1 结论	125
7.2 未来工作展望	126

附录 符号说明 128

1 绪论

密闭生态系统的概念是在生态学成为一门自然科学不久后提出的。Haeckel 最早于 1866 年(Kristina *et al.* , 1997)用“生态学”一词来描述生物与它们所栖息的环境之间关系的科学(Mackenzie *et al.* , 2001)。1935 年,Tansley 首次提出生态系统的概念(Allen *et al.* , 1998)。生态系统是指在一定空间中共同栖居着的所有生物(即生物群落)与其环境之间由于不断地进行物质循环和能量流动过程而形成的统一整体。

生态系统按受人类干预的程度可分为自然生态系统(如远离海岸的无人孤岛),半人工、半自然的生态系统(如农业生态系统)以及人工生态系统(如城市生态系统、密闭生态系统)(Kristina *et al.* , 1997; Mackenzie *et al.* , 2001)。理想的密闭生态系统(图 1-1),就是在一个密闭空间内,创造人类可以生存的基本环境,然后选择一些在代谢功能上与人的生存密切相关的植物、动物和微生物,组成一个代谢循环,从而使这种代谢循环维持动态平衡,能够长期存在下去(Christian *et al.* , 1994)。

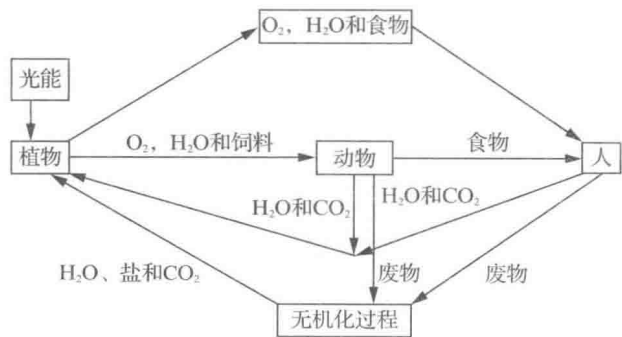


图 1-1 理想的密闭生态系统

在密闭生态系统中,受控生态生命保障系统(CELSS)是目前研究最多、最广泛的。在人类第一次进入太空后不久,有学者就试图将生物应用于未

来长期空间载人飞行的生命保障(郭双生等,1995a),前苏联和美国科学家在这方面进行了大量的探索性研究,前苏联于20世纪60年代初即提出建立生物生命保障系统(BLSS)(Salisbury *et al.*, 1997),美国国家航空和宇宙航行局(NASA)于20世纪70年代末提出受控生态生命保障系统的概念(郭双生等,1996a),其目的就是希望通过在现在的生命保障系统中引入生物,实现生命活动所必需的 O_2 , H_2O 和食物的闭合循环(Christian *et al.*, 1994)。

1.1 生命保障系统

宇航空间环境十分恶劣,高真空、宇宙辐射、温度差异大等因素对人体伤害严重,人在这种环境里是不可能生存的。为了保证进入空间的航天员的生命安全不受外界环境的伤害,人们研制了一个基本与外界隔绝的密闭环境——密闭舱。在密闭舱中,生命保障系统对维持宇航员的生命至关重要。理想的生命保障系统,亦即受控生态生命保障系统,能连续不断地供给 O_2 、供给 H_2O 、供给食物、净化空气、清除废物,维持人、植物、动物的生存,保持一个基本平衡稳定的闭环微小生态环境(Christian *et al.*, 1994)。

但是,现有的生命保障系统功能并不完善,都不是严格意义上的密闭系统。例如,1966年,Collins 和 Young 的首次太空飞行就是预先带上储备充足的 O_2 , H_2O 和食物,飞行过程中产生的 CO_2 被 $LiOH$ 吸收,其他产生的废物或者丢弃在太空中,或者被收集带回地球(Hacker *et al.*, 1977)。这种纯消耗式的生命保障系统一般称之为开路式生命保障系统。从飞行成本角度考虑,开口回路系统适合于在空间短期飞行、月球旅行甚至在低轨道中长期飞行。但是在长期的载人火星旅行或在月球上建立基地时,开口回路系统的成本太高而难于承受。为此,从最初的开路式生命保障系统到逐渐成熟的物/化再生式生命保障系统,以及正在广泛研究的未来受控生态生命保障系统(物/化/生物再生式生命保障系统),生命保障系统的发展方向就是采用物理、化学以及生物的手段提高该系统的闭合程度,以减少生命必需的 O_2 , H_2O 和食物的供给(图1-2)(雷雯,2000),同时减少舱内废水、固体废弃物、 CO_2 以及空气中污染物的累积(图1-3)(黄志德等,2000)。

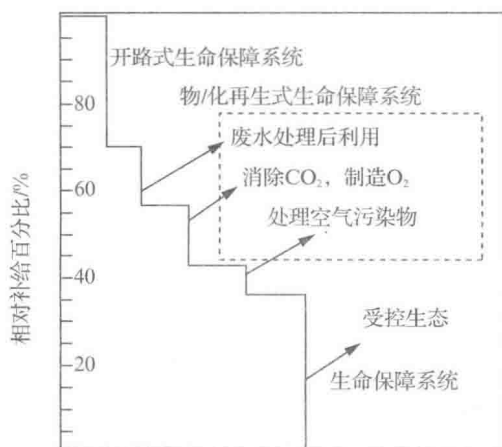


图 1-2 不同闭合程度生命保障系统的补给率

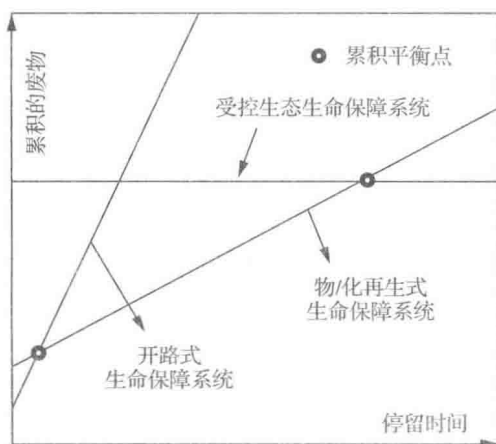


图 1-3 不同闭合程度生命保障系统的废物累积趋势

1.2 物/化再生式生命保障系统

与开放式生命保障系统相比,物/化再生式生命保障系统实现 O_2 和 H_2O 的再生,同时将产生的 CO_2 、废水、固体废弃物和空气污染物进行处理再利用。该系统发展到现在,基本上能实现生命活动必需的 O_2 和 H_2O 的闭合循环

(Cathssaseb *et al.*, 1997)。除早期的一些航天飞行器外,截至目前,其他所有的外太空飞行器都或多或少采用了物/化再生技术进行生命保障。在这方面,俄罗斯走在最前沿,从“礼炮”号空间站、“和平”号空间站到与美国合作的国际空间站,俄罗斯已积累数十年的实际太空飞行经验(吴国兴,1998 和 1999)。

目前,在外太空停留的永久性空间站只剩下国际空间站(Jorgensen,2000),该空间站的生命保障系统使用了物/化再生式生命保障系统。以下以国际空间站为例,对物/化再生式生命保障系统做一个概述。该系统由六个子系统组成(Cathssaseb *et al.*, 1997;廖少英,1992;吴国兴,1998 和 1999):大气控制与供应子系统、大气再生子系统、水回收与管理子系统、废物管理子系统、温度与湿度控制子系统和火情探测与灭火子系统。在空间站设计之初,NASA 确定了空间生命活动的日常需求量(主要包括 O_2 、 H_2O 和食物)及产生的废弃物量(主要包括 CO_2 、卫生废水和粪便)以及空间站空气质量要求(Carrasquillo *et al.*, 1997)。各子系统根据这些要求进行相应的设计。

1.2.1 大气控制与供应

该子系统由两部分组成:舱内两种气体和总压力控制装置以及装在舱外的气体储存和供应装置。前者采用计算机反馈控制与多输出质谱仪相结合的设计,通过适当的阀门控制 O_2 和 N_2 分压。在舱内显示器上,多输出质谱仪可输出水蒸气、 CO_2 、 H_2 和 CH_4 的分压。后一种装置采用超临界储存 O_2 和 N_2 。空间舱内会有一定的大气泄漏,必须不断地补充 N_2 ,以保持舱内压力。此外,还需要用 N_2 来定期清洗其他生保子系统和过渡舱。在设计舱内大气中, O_2 占 21%, N_2 占 79%,总压力为 103 kPa。另外一种被广泛研究的 N_2 储存方法是在超临界下,以联胺(N_2H_4)的方式储存。 N_2H_4 在热催化条件下,可发生如下裂解反应:



反应生产的 H_2 送往 Sabatier 分系统,用于还原 CO_2 。

1.2.2 大气再生

该子系统由 CO_2 清除、 O_2 再生及微量污染物控制与监测装置组成。空气中的 CO_2 用 4B 分子筛浓缩收集。获得的 CO_2 通过 Sabatier 分系统还原,产物包括 CH_4 和 H_2O 。前者将被收集用作推进剂,亦可被分解回收 H_2 。 O_2 再生通过电解水实现。微量污染物控制与监测装置采用气相色谱/质谱联机,可实时提供空气中气体污染物(24~250 AMU)的读数。在 24 AMU 以下的污染物,则用一台红外型 CO 监测器监测。对于固体污染物,则用激光散射探测仪监测。

1.2.2.1 CO₂ 还原系统

在早期的航天飞行中,CO₂ 主要用 LiOH 来吸收,产物被带回地球处理。国际空间站通过 Sabatier 分系统将收集的 CO₂ 还原,在 570~580 K 高温和钌催化剂的作用下,该子系统发生如下反应:



该反应为放热反应,在达到反应温度后,该反应可连锁进行。当温度大于 866 K 时,就发生相反的吸热反应,可避免过热。此外,还有一种 Bosch 还原分系统亦可实现 CO₂ 的还原,其反应如下:



反应生成的碳沉淀在催化剂上。因此,必须定期地更换反应器中的催化剂。用 Bosch 还原分系统最大的问题是其单程还原效率小于 10%,要获得完全反应必须反复进行。

1.2.2.2 O₂ 制造系统

早期的航天飞行并不再生 O₂,航天飞机预先储备足够的 O₂。国际空间站采用水电解法来再生 O₂。该方法是将过滤后的水流进电化学箱,箱内装有 KOH 电解液。在电化学箱中发生如下反应:



产生的 O₂ 直接送入舱内大气,H₂ 则送到 Sabatier 分系统反应器,多余的 H₂ 和 CH₄ 则作为电阻加热电离式发动机的气体推进剂。

1.2.3 水回收与管理

该子系统由两条回路组成,饮用水回用和卫生用水回用(黄志德等,2000)。为确保回收回路中的水质,该子系统具有实时的监测和控制装置(图 1-4)。该子系统有四个水箱,将饮用水回路输出的水分成正在被测试的水、正在被处理的水、可以饮用的水以及正在被使用的水。这种设计还有利于对水箱中的水作 24 h 的微生物检测。饮用水和卫生用水的回收装置都采用多重过滤器。这种过滤器由前过滤器和升温部分组成,进来的污水在进入下一道处理程序之前,需在 121 °C,20 min 条件下,灭活水中微生物。出来的水进入一个特殊处理床,床内装有碳质材料和离子交换树脂。前者过滤有机污染物,后者过滤金属污染物。床内还有一种杀菌树脂,可有效防止微生物在床内繁殖。在处理床后是一台挥发性物质清除装置,用来清除小分子和易挥发的有机物。在尿液储箱中,先用硫酸对尿液进行化学稳定处理,再加入 KHS₂O₈ 杀菌剂,抑制微生物繁殖。尿液

在进入多重过滤床之前会先经过蒸汽压缩蒸馏系统进行预处理。

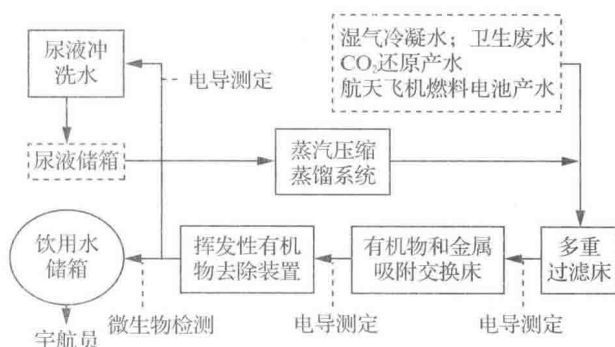


图 1-4 国际空间站的水处理回用系统

其他研究的物/化水处理再生技术包括热电组合膜蒸发技术(主要用来处理尿液)、冷冻干燥技术、反相渗透技术、化学沉淀过滤技术(处理卫生废水)、蒸汽相催化氨去除技术、化学吸附法(活性炭法)以及催化剂铂金法(滕育英,1992)。

1.2.4 其他

废物管理是指在和平空间站上,宇航员的卫生废物收集系统由粪便收集、储存和返回装置组成(沈学夫等,1991)。装置中的袋子储存粪便,并可吸收粪便散发出的气体。当容器装满粪便后,密封送回地球,并用空的塑料容器取代。

温度与湿度控制子系统有三项功能(Wieland, 1994):舱内空气温/湿度和通风控制、航天电子设备冷却、冷冻保藏。温度与湿度控制采用冷凝热交换器和液/气分离器冷却装置;航天电子设备冷却采用中央液/气热交换器;冰箱和冷藏柜可对食品、胶卷和生物标本分别提供 0.6℃和-29℃的冷藏。

火情探测与灭火系统主要由烟火探测器、手提式和固定式灭火器组成(Friedman, 2000)。其灭火介质为 CO₂。固定式灭火器可自动和手动操作。手提式灭火器适用于轻度火灾。对烟的探测用光电传感器,对火焰探测主要用紫外线和可见光谱探测器。

1.3 受控生态生命保障系统

利用物理和化学的手段,可以实现生命保障系统在 O₂ 和 H₂O 的闭合循环。但是,要进一步实现食物的循环,就必须在生命保障系统中引入生物(Ashida, 2003)。

目前,俄罗斯、美国、欧洲和日本都在对此进行研究,并建立大型的生态生命保障系统研究实验装置(郭双生等,1996c, 1999 和 2000;王爱华,1991 和 1992;刘述运,1999)。

1.3.1 俄罗斯和 BIOS-3

早在 19 世纪 30 年代,前苏联科学院西伯利亚分院生物物理所和国内几个研究中心的科学家们就着手以生态理论为基础研究生物生命保障系统,以便满足未来人类长期宇宙活动的需求。19 世纪 60 年代,他们设计了一个“人-藻类(小球藻)”密闭系统。实验持续 4~6 周,证明藻类能够成功地完成与系统中人的大气和水交换的功能(Salisbury *et al.*, 1997)。

1972 年,由前苏联科学院的 Korolyov 院士倡议建造“BIOS-3”,该系统位于俄罗斯 Siberian 中部 Krasnoyarsk,是一个小型密闭的“人-植物”人工生态系统。它是为人类未来长期宇宙活动而设计的一套非常成功的生物生命保障系统地基模拟装置(图 1-5)。BIOS-3 由不锈钢板焊接而成,体积为 315 m^3 ,面积为 63 m^2 。仅有几个可封闭的窗口可与外界连通。其内包括四个大小相同的部分:三个人工气候室(其中两个栽培小麦、一个种植蔬菜);另外一个为乘员居住区,包括居住间、厨房、餐厅、盥洗室、实验室和控制室以及几套废物处理系统。此外,还具备小麦加工、不可食生物量利用、维修、体重和测量等所需设备。整个系统全部实行自动监控。BIOS-3 在物质(包括大气、 H_2O 和食物)上尽可能地实现闭环,而在能量和信息方面实行开环。电能和电视节目均由外部输入,并可通过电话或监测装置与外界进行对话交流。以下简单介绍 BIOS-3 在大气调控、食物生产、水循环以及废物处理方面获得的实验结果。

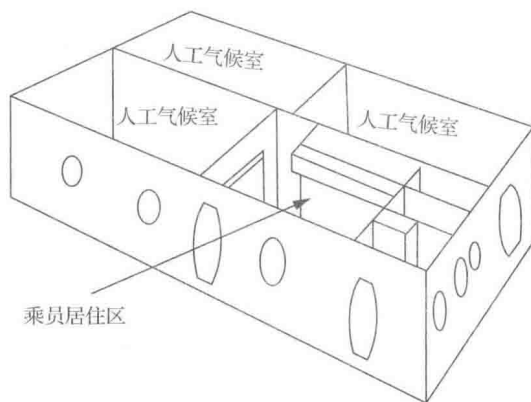


图 1-5 BIOS-3 示意图^①

^① Salisbury, 1997.

1.3.1.1 大气调控

BIOS-3 中每天的大气泄漏率约为 $0.01\% \sim 0.05\%$ 。为了满足人与植物对大气的不同要求,将居住间内富含 CO_2 的气体抽入人工气候室来降低其中的 CO_2 、水蒸气及其他气体的浓度。人工气候室中充满 O_2 的气体则输入居住间内。此外,还需利用热催化炉燃烧所有有机物(主要为植物不可食生物量)而产生额外的 CO_2 ,以增加人工气候室内的作物产量。三个人工气候室每天共吸收 $1\,500\text{ L}$ 的 CO_2 ,其中, 735 L 由“乘员”呼吸释放, 765 L 由植物不可食生物量燃烧释放。大气中的有机混合物,在 $700\text{ }^\circ\text{C}$, $250\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下,通过热催化膜系统进行纯化。在整个实验过程中,对大气有机污染物的纯化足以保持植物的稳定生长发育。居住间内大气 CO_2 的体积浓度为 $1\% \pm 0.5\%$ 。大气主要微量污染物的浓度见表 1-1,它们并未对人的健康产生不良影响。

表 1-1 BIOS-3 中居住区内污染物及浓度

微量污染物	单位	平均浓度
CO_2	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	2.5 ± 4.2
轻有机污染物总量	$\text{mgO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$	3.2 ± 9.5
重有机污染物总量	$\text{mgO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$	21.5 ± 17.4
NH_3	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.16 ± 0.13
H_2S	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.1 ± 0.2
硫醇	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.3 ± 0.2
乙醚	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.20 ± 0.02

1.3.1.2 食物生产

BIOS-3 中的食物闭合程度由实验初期的 $40\% \sim 50\%$ 逐渐提高到 80% 左右,其余 20% 在实验时一同带进,主要为冻肉、食盐等。食谱结构主要由“乘员”对植物营养的基本需求、个人胃口嗜好和身体负荷来决定,包括粮食、蔬菜和油料作物三大类。

植物用氙灯 24 h 连续照射提供光能,小麦借助于空气地下灌溉法栽培,蔬菜和油料莎草则用黏土粒水培法培养。可食部分因种而异,平均食物生产率为 $35\% \sim 40\%$;植物营养液由预先储存的盐、酸及尿液来补充。每种作物种植在一个培养区内,同时具备 $2 \sim 10$ 茬不同株龄的作物,这就减缓不同栽培种由于年龄变化引起的光合效率的波动从而增强光合生产率的稳定性。

在整个实验期内,植物间没有发生不良相互作用。所有植物都完成 1.3~4 次完整的生长周期循环。结果表明:13 m² 的播种面积足以连续提供一个人的 O₂, H₂O 和 40%~45% 的食物。其中有一次实验成员的食物全部由植物提供,此时种植面积增加到 30 m²/人,但这引起 O₂ 和植物不可食生物量的大量过剩与积累,并因此必须焚烧后者,为植物光合作用准备所需的额外 CO₂,同时相应地降低 O₂ 含量。

1.3.1.3 水的循环

考虑到该系统可能用在将来建立月球基地上,由于月球的光节律(每月 14 个白昼/14 个黑夜)与地球的不相同,正在发育成长的植物往往不能忍受长期连续黑暗。因此,对小麦、大麦、豌豆、番茄等进行一系列模拟实验,主要手段就是降低温度(2.5~3.0℃)以保持植物在 14 d 黑暗期间处于“休眠状态”。实验证明:大多数植物均安全渡过“月球黑暗期”,并于“月球白昼期”恢复正常生长,不过产量较对照的下降了 30%~50%。

除拿出去作物化分析用的水和气体外,该系统中的水交换就像大气一样,为完全闭环。植物蒸腾及蒸发湿气冷凝水用作饮用和日常用水水源。饮用水用活性碳和离子交换树脂柱进行纯化;卫生水进行煮沸处理,清洁(洗澡、洗脸等)用水通过细网过滤。污水同尿液一样,即不进行任何处理而是存放一定数量后直接加入小麦苗养液,这样系统中矿质营养元素的闭合程度可达 24%。

1.3.1.4 废物处理

植物的不可食生物量通过焚烧化为灰烬,而其耐火部分、厨房废物、粪便等则在该系统中进行干燥处理,水分回归大气,剩余部分连同灰烬一起存储起来直到每轮实验结束。

在 BIOS-3 中引入粮食、油料及蔬菜作物后,食物的消耗量(208 g·d⁻¹)只有再生循环前(924 g·d⁻¹)的 22.51%。生活必需品的总供应量(598.2 g·d⁻¹)缩减到再生循环前(13 010.5 g·d⁻¹)的 4.6%(表 1-2)。此外,主要营养物质的闭合循环达到 35.3%~77.5%。在实验前、中和后期对成员健康状况进行评估。结果表明:几个月的封闭实验并未影响健康,成员体重变化幅度为 ±800 g,工作能力很高,各项任务均能圆满完成。综上所述,在 BIOS-3 中进行的密闭系统生命保障实验的结果证实受控生态生命保障系统在概念上是可行的。