0254-6124/2022/42(6)-1161-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

TANG Yongkang, SHEN Yunze, AI Weidang, WU Zhiqiang, MAO Ruixin, WU Hao, HU Wei, FENG Hongqi. Effects of Different Particle Sizes on the Bulk Density, Porosity Character, Water Suction of Substrates (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(6): 1161–1170. DOI:10.11728/cjss2022.06.220125009

不同粒径组合对植物栽培基质容重及孔性和水吸力的影响*

唐永康 沈韫赜 艾为党 吴志强
毛瑞鑫 吴 浩 胡 伟 冯红旗

(中国航天员科研训练中心 人因工程重点实验室 北京 100094)

摘 要 研究粒径对栽培基质容重、孔性和水吸力的影响，以便为空间植物培养提供栽培基质。采用4种基质，即Profile基质（P）、黑陶粒（B）、白陶粒（W）和蛭石（V），各基质按照不同粒径（< 1 mm，1～2 mm，2～3 mm）组成设置了10种组合（体积百分比），研究测试不同粒径组合基质的基本理化特性、容重、孔性和水吸力。P和B基质的容重约0.70 g·cm^{-3}。P基质含有较多矿质养分离子；增加小粒径基质颗粒占比，不同组合基质的容重、总孔隙度和持水孔隙度均显著增加，但通气孔隙度下降；在10种不同基质组合中，P7（40-60-0）、B8（10-70-20）和W4（10-60-30）分别具有最高的总孔隙度，P8（10-70-20），B1（20-50-30）和W8（10-70-20）具有最高的气水比，P3（50-50-0），B3（50-50-0）和W3（50-50-0）具有最高吸附水量；4种基质的平均总孔隙度和吸水量大小顺序为V>P>B>W。因此，P3（50-50-0）基质和B7（40-60-0）基质具有适中的容重、良好的孔性和较高的水吸力，适用于空间植物栽培。

关键词 粒径，栽培基质，容重，孔性，水吸力

中图分类号 V524

Effects of Different Particle Sizes on the Bulk Density, Porosity Character, Water Suction of Substrates

TANG Yongkang SHEN Yunze AI Weidang WU Zhiqiang
MAO Ruixin WU Hao HU Wei FENG Hongqi

(*National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing* 100094)

Abstract To study the effects of different particle sizes on the bulk density, porosity character, water suction of substrates and select suitable substrate combinations for higher plants cultivation in space. Four substrates including profile particle (P), black ceramic particle (B), white ceramic particle (W), and

* 人因工程重点实验室预先研究项目（GJSD18001 和 6142222210701）
2022-01-21 收到原稿，2022-10-16 收到修定稿
E-mail：yktang@126.com. 通信作者 吴志强，E-mail：wzqacc@126.com

vermiculite (V) were selected, and 10 kinds of particle size combinations (volume percent) are set, in which basic physicochemical character, bulk density, porosity character and water suction were tested. The bulk density of P and B substrates was 0.70 g·cm^{-3} and there were many minerals in P substrate. The bulk density, Total Porosity (TP) and Water Holding Porosity (WHP) of different substrate combinations increased significantly ($p < 0.05$) with the increase of proportion of < 1 mm particle size of substrates, but not for Air Porosity (AP). In the 10 kinds of substrate combinations, there were the highest total porosity for P7 (40-60-0) , B8 (10-70-20) and W4 (10-60-30), the highest water air ratio for P8 (10-70-20), B1 (20-50-30) and W8 (10-70-20), the highest adsorption water volume for P3 (50-50-0), B3 (50-50-0) and W3 (50-50-0). The order of average total porosities of 4 kinds of substrates was V> P> B> W. There are moderate bulk density, good porosity character and higher water suction for the P3(50-50-0) and B7 (40-60-0) substrates, which are suitable for plants cultivation in space.

Key words Particles size, Substrate, Bulk density, Porosity character, Water suction

0 引言

在受控生态生保系统(Controlled Ecological Life Support System, CELSS)中,植物作为其中的关键生物部件,可以吸收二氧化碳,为乘员提供食物、氧气和水,调节乘员的心理[1]。自人类开展太空飞行活动以来,就一直尝试在空间轨道上培养植物,以评估空间飞行环境对植物的影响。

目前,相关国家及组织已在空间搭载过 40 多种不同的植物培养装置,开展空间失重环境下的植物培养试验研究[2–4]。在空间失重环境下培养植物的方式包括液膜培养和基质培养,其中基质培养是空间植物培养的主要方式[5]。已在空间应用过的植物栽培基质主要有离子交换树脂、琼脂、泡沫材料、沸石、蒙脱土、蛭石等[6–8]。基质特性(包括 pH 值、容重、孔性和水吸力等)是影响其在空间应用效果的重要因素。Hoehn 等[6] 研究了不同类型基质的供水特性,Steinberg 等[7] 筛选研究了蒙脱土的理化特性和水分特性,Guo 等[9] 筛选研究了陶瓷颗粒作为植物栽培基质,Adams 等[10] 研究了蒙脱土的活性养分、养分吸附和植物吸收等几方面内容。这些研究主要集中在单一均质基质的物理特性上,缺少对不同粒径基质组合后对土壤物理性质的影响。因此,本文在前期研究[11] 基础上,开展了不同粒径对栽培基质容重、孔性和水吸力影响的比较研究,旨在为栽培基质的空间应用提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用 4 类无机植物栽培基质,即 Profile 颗粒土(P)[10]、黑陶粒(B)、白陶粒(W)和蛭石(V)[8]。其中,P 基质来自美国黏土矿石,B 和 W 基质是通过煅烧不同岩石而形成的多孔颗粒物,V 基质由花岗岩高温煅烧而成。其中 P/B/W 基质设计 3 种粒径,即< 1 mm, 1～2 mm, 2～3 mm。V 基质设计一种粒径(1～2 mm),作为对比参照。不同基质的外观形貌及微观电子显微镜扫描图见文献 [11]。

1.2 试验设计

3 种基质(P/W/B)均设计 10 种粒径组合(见表 1),以 1～2 mm 粒径的基质为主(1～3 组合的体积占比为 50%, 4～7 组合的体积占比为 60%, 8～10 组合的体积占比为 70%),配置不同比例的< 1 mm 基质(10%～50%)和 2～3 mm 基质(0～30%)。其中,蛭石(V)仅设置一种比例,即 0-100-0(全部为 1～2 mm 粒径蛭石),用于对照参比。不同粒径基质配置后,充分混匀。

1.3 试验方法

基质基本特性(pH 值、电导率和重金属含量)、容重和孔性的测定方法参照标准 NY/T2118-2012《蔬菜育苗基质》和 GB/T 33891-2017《绿化用有机基质》。采用 1～2 mm 粒径测定基质的基本特性,容重和孔性的测定则采用不同粒径组合基质。

1.3.1 基本特性

(1)酸碱度(pH 值):采用一定体积比例的基质与

去离子水的浸提液测定 pH 值。

(2)电导率(Electric Conductivity, EC): 反映栽培基质中可溶性盐分的含量, 单位为 mS·cm^{-1}。

(3)重金属含量(Heavy Metal Content, HMC): 取烘干基质测定其重金属(镉、铬、铅、汞和砷)含量。

1.3.2 容重

测定不同粒径组合基质的容重(Bulk Density, BD), 即单位体积(50 cm^3)的基质干重, 单位为 g·cm^{-3}。

1.3.3 孔性

(1)总孔隙度(Total Porosity, TP): 基质中所有孔隙(持水孔隙和通气孔隙)的总和, 以相当于基质体积的百分数(%)表示。

(2)持水孔隙度(Water Holding Porosity, WHP): 基质中水分所占的空间, 一定程度上反映了基质的保水力, 以相当于基质体积的百分数(%)表示。

(3)通气孔隙度(Air Porosity, AP): 基质中空气所占的空间, 以相当于基质体积的百分数(%)表示。

(4)气水比(Water Air Ratio, WAR): 基质中通气孔隙度与持水孔隙度的比值。

1.3.4 水吸力

取烘干的不同粒径组合栽培基质 100 mL, 混合均匀, 置于直径 29 mm 的 100 mL 塑料量筒内。量筒底部均匀对称打 8 个直径 5 mm 的圆孔, 然后用双层定性滤纸包裹圆孔, 外部水溶液可从双层滤纸均匀进入量筒内基质。量筒放入直径 110 mm 的培养皿中。试验时, 在培养皿中快速加入 150 mL 0.2% 的曙红水溶液, 定时(0.5, 1, 2, 5, 10, 30, 60, 120 min)观察、测定并计算湿润锋液面上升高度和速率, 试验结束时测量培养皿剩余曙红溶液的体积。

表 1 4 种栽培基质不同粒径组合

Table 1 Combinations of different particle size of four kinds of substrates

Combinations	P	B	W	V
1	20-50-30	20-50-30	20-50-30	0-100-0
2	30-50-20	30-50-20	30-50-20	
3	50-50-0	50-50-0	50-50-0	
4	10-60-30	10-60-30	10-60-30	
5	20-60-20	20-60-20	20-60-20	
6	30-60-10	30-60-10	30-60-10	
7	40-60-0	40-60-0	40-60-0	
8	10-70-20	10-70-20	10-70-20	
9	20-70-10	20-70-10	20-70-10	
10	30-70-0	30-70-0	30-70-0	

注 每组数字表示三种粒径(<1 mm, 1～2 mm, 2～3 mm)的体积百分比。

1.4 统计分析

本试验所有处理均设置重复(重复次数 $n = 3$), 进行统计分析。对数据进行方差分析和回归分析, 并采用 SAS 9.2(SAS Inc., Cary, NC)统计软件对不同处理的平均值进行多重比较, 以 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 表示统计学显著和极显著意义。

2 结果与分析

2.1 基本特性

4 种栽培基质的酸碱度(pH 值)列于表 2。黑色陶粒的 pH 值超出 NYT2118-2012 标准要求(5.5～7.5), 在使用时需要进行酸化处理, 减小高 pH 值对植物生长的不利影响。P 基质的电导率最高, 黑陶粒的电导率最小。这表明, P 基质中有较多可溶性盐分, 可作为植物根系吸收利用的矿质养分。黑陶粒为烧结的材料, 可溶性盐分较少。P 基质的水浸提液电导率符合 GB/T 33891-2017 的标准要求(300～1500 μS·cm^{-1}), 而其他 3 种基质略低于该标准。4 种植物栽培基质中的 5 种重金属含量极低, 符合 GB/T 33891-2017 标准中的重金属含量 I 级标准。

2.2 容重

P 基质的容重随着<1 mm 粒径比例的增加而增加(见表 3), P4 的容重最低, P10 的容重最高。P2, P3, P5～P10 之间的容重无明显差异, 但却显著高于 P1 和 P4。B 基质的容重变化趋势与 P 基质相似, 但不同组合之间的差异更加明显。<1 mm 黑陶粒较低比例的 B1, B4 和 B8 容重显著低于其他处理, B3, B7 和 B10 的容重显著高于其他处理, B2, B5, B6 和

表 2 不同栽培基质基本物化特性

Table 2 Physical-chemical characteristics of four kinds of substrates

Substrates	pH	EC/(μS·cm^{-1})	Heavy metal content/(mg·kg^{-1})				
			Cd	Cr	Pb	Hg	As
P	6.31	372.6	0.113	187.5	10.8	0.105	1.62
B	9.34	121.4	0.079	140.0	51.8	0.022	1.94
W	7.62	224.2	0.021	41.5	5.8	0.108	1.32
V	7.64	177.3	0.021	226.0	3.3	0.134	1.44

B9 的容重适中。W 基质不同组合之间的差异较小，W1 容重最小，W10 具有最大的容重，W1～W9 之间的容重无显著差异，而 W10 容重显著高于 W1，W3 和 W4。3 种基质(P/B/W)不同组合的平均容重均显著高于 V 基质的容重，W 基质具有最大的容重，P 和 B 基质之间的容重无显著差异。

对不同组合基质 P/B/W 的容重与不同粒径(<1 mm, 1～2 mm, 2～3 mm)比例进行直线回归分析，所得回归方程、R^2 和显著性见表 4。3 种基质 P/B/W 的容重直线回归方程 R^2 分别为 0.75, 0.89

表 3　不同粒径组合基质的容重比较（单位 g·cm^{-3}）

Table 3　Comparisons of bulk density of different size combinations of substrates (Unit g·cm^{-3})

Combinations	P	B	W	V
1	0.672±0.014 bc B	0.617±0.014 de C	1.229±0.035 c A	—
2	0.689±0.018 ab B	0.693±0.044 abc B	1.249±0.011 abc A	—
3	0.692±0.013 a C	0.738±0.008 abc B	1.241±0.011 bc A	—
4	0.666±0.005 c B	0.604±0.040 de C	1.236±0.023 bc A	—
5	0.687±0.005 ab B	0.639±0.036 cd B	1.249±0.019 abc A	—
6	0.687±0.006 ab B	0.681±0.044 bc B	1.257±0.007 abc A	—
7	0.692±0.006 a B	0.739±0.042 a B	1.263±0.011 ab A	—
8	0.683±0.006 abc B	0.573±0.025 e C	1.244±0.017 abc A	—
9	0.691±0.008 a B	0.649±0.034 bcd C	1.253±0.012 abc A	—
10	0.693±0.014 a B	0.701±0.026 ab B	1.274±0.021 a A	—
Average	0.685±0.010 B	0.663±0.031 B	1.250±0.017 A	0.385±0.013 C*

注　每一栏内标注相同小写字母表示不同组合之间无显著差异($p < 0.05$)，每一行内标注相同大写字母表示同一组合不同基质之间无显著差异($p < 0.05$)，重复数$n = 3$，*表示1～2 mm 粒径蛭石的容重(即组合0-100-0)。

表 4　不同粒径组合基质的容重、孔性及水吸力回归分析

Table 4　Regression analyses of bulk density, total porosity, and water suction of different size combinations of substrates

Regression analyses		P	B	W
Bulk density	Equation	Y=0.00117X_1+0.00093X_2+0.00051X_3+0.591	Y=0.00223X_1–0.000213X_2–0.0023X_3+0.657	Y=–0.000085X_1+0.000942X_2–0.000832X_3+1.209
	R^2	0.75	0.89	0.72
	F (Sig.)	5.792 (0.033)*	26.454 (0.001)**	5.194 (0.042)*
Total porosity	Equation	Y=–0.0654X_1+0.0439X_2–0.1066X_3+64.699	Y=0.01983X_1+0.1519X_2+0.2169X_3+29.673	Y=–0.3049X_1+0.01065X_2-0.1998X_3+68.942
	R^2	0.42	0.53	0.87
	F (Sig.)	1.453 (0.318)	2.264 (0.181)	13.331 (0.005)**
Water air ratio	Equation	Y=–0.00387X_1+0.000567X_2+0.00193X_3+0.302	Y=0.0135X_1–0.000657X_2+0.0228X_3–0.429	Y=0.00029X_1+0.00718X_2+0.00611X_3–0.227
	R^2	0.79	0.77	0.90
	F (Sig.)	7.402 (0.019)*	6.636 (0.025)*	18.853 (0.002)**
Water suction	Equation	Y=1.052X_1+0.0486X_2+0.782X_3–14.202	Y=0.611X_1+0.0368X_2+0.220X_3+6.806	Y=0.239X_1–0.177X_2+0.0141X_3+23.412
	R^2	0.84	0.85	0.83
	F (Sig.)	10.465 (0.008)**	11.158 (0.007)**	9.988 (0.009)**

注　X_1, X_2, X_3 分别表示三种粒径(<1 mm, 1～2 mm和2～3 mm)的体积百分比。*表示在$p < 0.05$下有显著性差异，**表示在$p < 0.01$条件下有极显著性差异。

和 0.72, 分别达到显著相关(B 基质为极显著相关)。其中, P 基质和 B 基质的容重与 X_1(<1 mm 粒径占比)成正相关(相关系数为 0.663, 0.951), 与 X_3(2～3 mm 粒径占比)呈负相关(相关系数–0.745, –0.939), 而与 X_2(1～2 mm 粒径占比)无显著相关(相关系数 0.194, –0.304)。W 基质的容重仅与 X_3 呈负相关(相关系数–0.592)。

2.3 孔性

2.3.1 孔隙度

如图 1(a)所示, 当 1～2 mm 粒径的 P 基质占比为 50% 时(组合 P1～P3), 增加<1 mm 粒径的基质(从 20% 增加到 50%), 并且减少>2 mm 粒径的基质时(从 30% 减少到 0%), P2 和 P3 的总孔隙度(TP)增加, 持水孔隙度(WHP)也显著增加, 但通气孔隙度(AP)则显著下降; 与 P 基质不同, B2 和 B3 的 TP 没有显著增加(见图 1 b), WHP 和 AP 的变化趋势相似; W1～W3 之间的 TP 和 WHP 均无显著性差异(图 1 c), 仅 W2 和 W3 的 AP 显著下降。

当增加 1～2 mm 基质占比为 60% 时(组合 P4～P7)和 70%(P8～P10)时, 增加小粒径颗粒, TP 和 WHP 逐渐增加, 而 AP 则逐渐下降。其中, P7 组合的 TP 显著高于 P4, WHP 则显著高于 P4～P6, 但是 P4～P7 之间 AP 无显著性差异。在 P8～P10 之间, TP 无显著性差异, P8 的 WHP 显著低于 P9 和 P10, P8 的 AP 显著高于 P9 和 P10; B4～B7 之间的 TP, WHP 和 AP, 以及 B8、B9 和 B10 之间的 TP, WHP 和 AP 均无显著性差异; W4 的 TP 值显著高于 W7, W8～W10 之间的 TP 值无显著性差异, W9 和 W10 的 WHP 值显著增加, AP 则显著下降。

4 种栽培基质(1～2 mm 粒径)孔隙度比较(见图 1d), V 基质的 TP(69.66%)显著高于其他 3 种基质, P 基质的 TP 显著高于 B 和 W 基质, B 基质的 TP(47.62%)最小; P 和 V 基质的 WHP 均显著高于 B 和 W 基质; 4 种栽培基质的 AP(9.00%～14.30%)无显著性差异。

根据孔隙度与不同粒径(< 1 mm, 1～2 mm, 2～3 mm)比例的直线回归分析结果(见表 4), 3 种基质 P/B/W 的孔隙度直线回归方程 R^2 分别为 0.42,

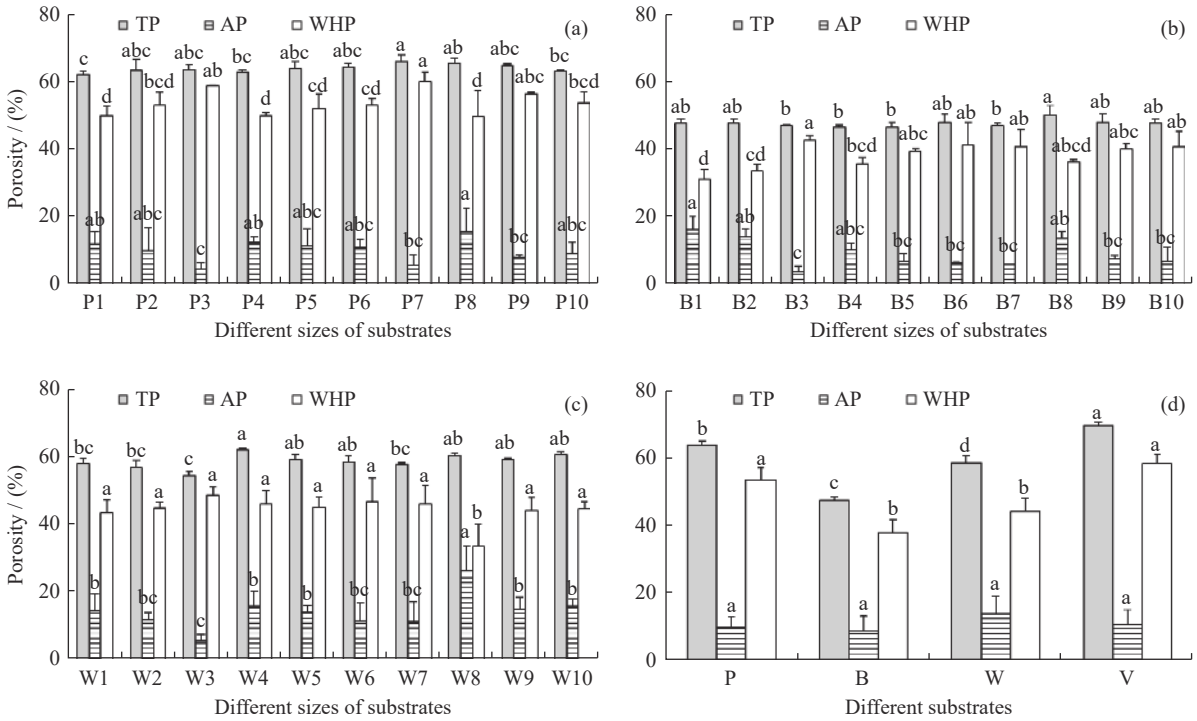


图 1 不同粒径组合 P/B/W/V 基质孔隙度(对于同一参数 TP, AP, WHP, 同一张图内标注相同小写字母表示不同组合之间无显著性差异, 即 $p < 0.05$, $n = 4$)

Fig. 1 Porosities of different size combinations of P/B/W/V substrates (For the same parameter of TP, AP , WHP, the same lowercase letter marked in the same figure indicates that there are no significant differences between different combinations, $p < 0.05$, $n = 4$)

0.53 和 0.87, 其中 W 基质的直线回归方程达到极显著性相关, 但 P 和 B 基质回归方程相关不显著。其中, P 基质和 B 基质的孔隙度与 X_1, X_2 和 X_3 均无相关性, 而 W 基质的孔隙度与 X_1 负相关(相关系数 −0.815), 与 X_2 和 X_3 正相关(相关系数 0.700, 0.581)。

比较不同基质组合的孔隙度大小(见表 5)。组合 P7 具有最高的 TP(65.91%)和 WHP(59.91%), 组合 P8 具有最高 AP。P 基质组合的孔隙度平均值分别为 TP(63.82%), WHP(53.60%)和 AP(10.22%); 组合 B8, B3 和 B1 分别具有最高的 TP(47.83%), WHP(42.79%)和 AP(16.37%)。B 基质组合的孔隙度平均值分别为 47.62% TP, 38.22% WHP 和 9.40% AP; 组合 W4, W3 和 W8 分别具有最高的 TP(61.95%), WHP(48.62%)和 AP(26.56%)。W 基质组合的孔隙度平均值分别为 TP(58.61%), WHP(44.31%) 和 AP(14.30%)。

表 5　不同粒径组合基质的总孔隙度值、持水孔隙度值和通气孔隙度值大小顺序

Table 5　Order of porosities of different size combinations of substrates

Order	TP			WHP			AP		
	P	B	W	P	B	W	P	B	W
1	P7	B8	W4	P7	B3	W3	P8	B1	W8
2	P8	B9	W10	P3	B6	W6	P4	B2	W10
3	P9	B6	W8	P9	B10	W4	P1	B8	W4
4	P6	B2	W9	P10	B7	W7	P5	B4	W9
5	P5	B10	W5	P2	B9	W5	P6	B9	W1
6	P3	B1	W6	P6	B5	W2	P2	B5	W5
7	P2	B7	W1	P5	B8	W10	P10	B10	W2
8	P10	B3	W7	P1	B4	W9	P9	B6	W6
9	P4	B5	W2	P4	B4	W1	P7	B7	W7
10	P1	B4	W3	P8	B1	W8	P3	B3	W3

注　TP为总孔隙度, WHP为持水孔隙度, AP为通气孔隙度。

2.3.2　气水比

从 3 种基质不同粒径组合基质的 WAR 值变化趋势来看(见图 2), 增加<1 mm 粒径的基质时, 基质的 WAR 值均呈现下降趋势(组合 1～ 3, 组合 4～ 7, 组合 8～ 10)。增加 1～2 mm 基质颗粒占比(50%～70%), P 基质(图 2 a)和 W 基质(图 2 c)的气水比呈现逐渐增加的趋势, 而 B 基质(图 2 b)的气水比则相反。4 种栽培基质(1～2 mm 粒径)气水比的结果比较见图 2 d, P 基质的 WAR 值与 V 基质相当, B 和 W 基质的 WAR 值较 V 基质大, 但 4 种基质之间的 WAR 比较并无显著性差异。3 种基质结果比较见表 6, P8, B1 和 W8 具有最高的 WAR 值, 分别为 0.34, 0.53 和 0.50; P3, B3 和 W3 具有最小的 WAR 值, 分别为 0.08, 0.10 和 0.12。

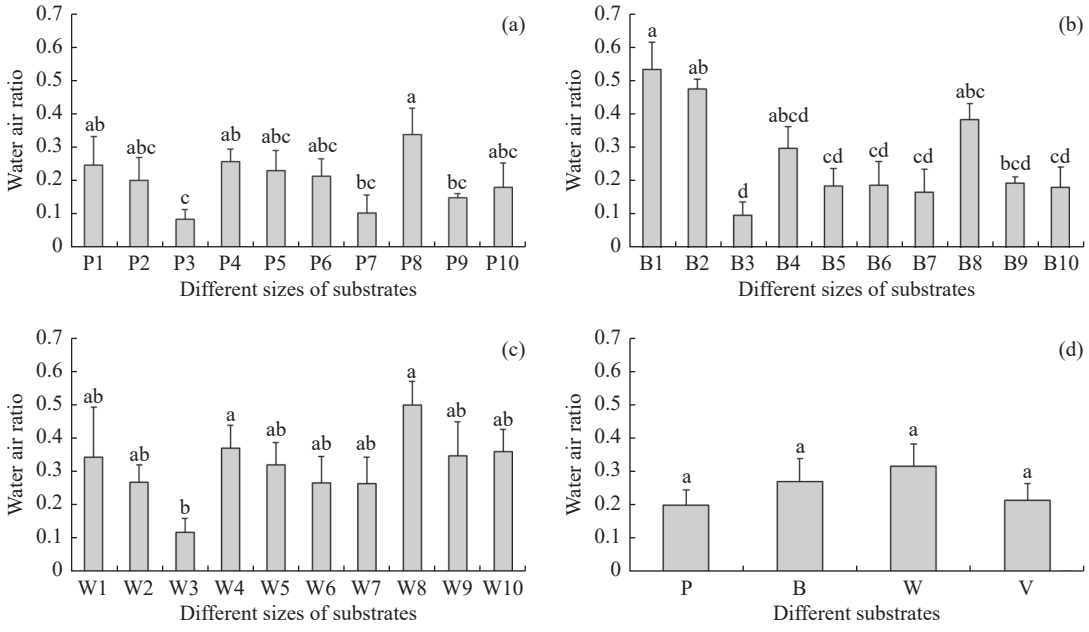


图 2　不同粒径 P/B/W/V 基质气水比

Fig. 2　Water air ratios of different size combinations of P/B/W/V substrates

从气水比与不同粒径(<1 mm, 1～2 mm, 2～3 mm)比例的直线回归分析结果看(见表 4), 3 种基质 P/B/W 气水比的直线回归方程 R^2 分别为 0.79, 0.77 和 0.90, 均达到显著性相关(W 基质为极显著性相关)。其中 P 基质的气水比与 X_1 负相关(相关系数 –0.875), 与 X_3 正相关(相关系数 0.866), 而与 X_2 无显著性相关(相关系数 0.246)。B 基质的气水比与 X_3 正相关(相关系数 0.733), 但与 X_1 和 X_2 无相关性(相关系数 –0.494, –0.329)。W 基质的气水比与 X_1 负相关(相关系数 –0.883), 与 X_2 和 X_3 正相关(相关系数 0.663, 0.754)。

表 6　不同粒径组合基质的气水比值大小顺序

Table 6　Order of water air ratios of different size combinations of substrates

Order	Water air ratio		
	P	B	W
1	P8	B1	W8
2	P4	B2	W4
3	P1	B8	W10
4	P5	B4	W9
5	P6	B9	W1
6	P2	B6	W5
7	P10	B5	W2
8	P9	B10	W6
9	P7	B7	W7
10	P3	B3	W3

2.4　水吸力

2.4.1　吸水高度

组合 P1～P3 中(图 3 a), 基质对水分的吸附上升速度随 <1 mm 粒径基质的占比增加而增加, 120 min 测试时间内, P3 具有较高的爬升高度, 即 112.5 mm(0.94 mm·min^{-1}); B1～B3 中(图 3 b)对水分的吸附上升速度与 P 基质相似, 120 min 测试时间内, B3 具有较高的爬升高度, 即 171.2 mm(1.43 mm·min^{-1}); 组合 W1～W3 中(图 3 c), 120 min 测试时间内, W3 具有较高的爬升高度, 即 94.5 mm(0.78 mm·min^{-1})。

组合 P4～P7 中, P7 具有较高吸水速率(111.9 mm, 0.93 mm·min^{-1}); 组合 B4～B7 中, B5, B6, B7 具有较高吸水速率(163.0 mm, 1.36 mm·min^{-1}); 组合 W4～W7 中, W7 具有较高吸水速率(98.3 mm, 0.82 mm·min^{-1}); P4, B4 和 W4 组合的吸水速率均较小。

组合 P8～P10 中, P10 具有较高吸水速率(99.4 mm, 0.83 mm·min^{-1}); 组合 B8～B10 中, B10 具有较高吸水速率(171.2 mm, 1.43 mm·min^{-1}); 组合 W8～W10 中, W10 具有较高吸水速率(75.0 mm, 0.63 mm·min^{-1});

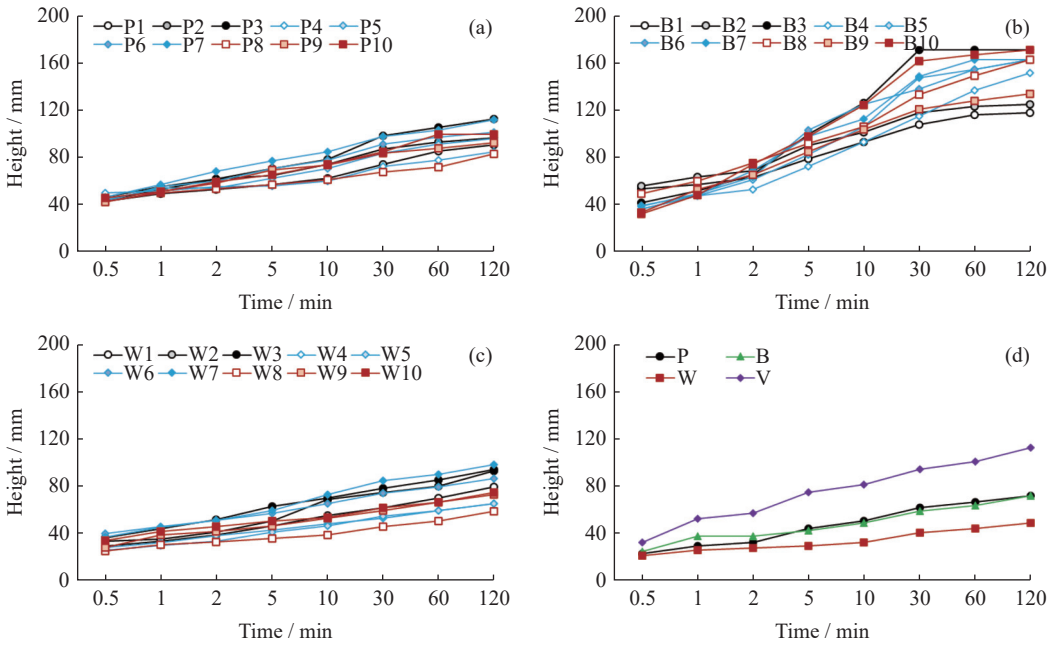


图 3　不同粒径 P/B/W/V 基质水吸力高度

Fig. 3　Water suction heights of different size combinations of P/B/W/V substrates

P8, B8 和 W8 组合的吸水速率均较小。

P/B/W 不同粒径组合基质的吸水速率大小顺序分别为 P3>P7>P6>P10>P2>P5>P9>P1>P4>P8, B3=B10>B5=B6=B7=B8>B4>B9>B2>B1, W7>W3>W2>W6>W1>W10>W9>W4>W5>W8。

4 种栽培基质(1～2 mm 粒径)吸水力测定结果的比较(图 3d), V 基质的吸水速率值最高, 达到 112.5 mm(0.94 mm·min^{-1}), 显著高于其他三种基质(p<0.05); P 基质和 B 基质的吸水速率值相当, 约 71.7 mm(0.60 mm·min^{-1}), 显著高于 W 基质。

2.4.2 吸附水量

表 7 给出了不同粒径组合基质的吸水量。P 基质中, P3 具有最高吸附水量(37.0 mL), P4 具有最小吸附水量(18.3 mL)。P 基质的吸附水量大小顺序为 P3>P2>P1>P7>P6>P10>P9>P5>P8>P4。P1,P2 和 P3 间的吸附水量显著高于其他基质组合。P6, P7 和 P10(P5 和 P9, 以及 P4 和 P8)之间的吸附水量也无显著性差异。

B 基质中, B3 具有最高吸附水量(37.7 mL), B4 具有最小吸附水量(18.3 mL)。B 基质的吸附水量大小顺序为 B3>B2>B7>B6>B10>B5>B1>B8>B9>B4。B2, B3, B6 和 B7 间的吸附水量显著高于其他基质组合。

W 基质中, W3 具有最高吸附水量(25.0 mL), W8 具有最小吸附水量(14.3 mL)。W 基质的吸附水量大小顺序为 W3>W2>W6>W7>W1>W10>W9>W4>W5>W8。W2, W3, W6 和 W7 的吸附水量显著高于其他基质组合。

4 种栽培基质(1～2 mm 粒径)中, V 基质的吸水量最高, 达 37.0 mL, 显著高于其他 3 种基质(p<0.05); P 基质和 B 基质的吸水量相当(无显著性差异), 约 20.0 mL, 显著高于 W 基质。

从水吸力(吸水量)与不同粒径(<1 mm, 1～2 mm, 2～3 mm)比例的直线回归分析结果看(见表 4), 3 种基质 P/B/W 吸水量的直线回归方程 R^2 分别为 0.84, 0.85 和 0.83, 均达到极显著性相关。其中, P 基质的吸水量与 X_1 正相关(相关系数 0.762), 与 X_2 负相关(相关系数–0.683), 而与 X_3 无显著性相关(相关系数–0.510)。B 基质的吸水量与 X_1 正相关(相关系数 0.911), 与 X_3 负相关(相关系数 –0.792), 而与 X_2 无显著性相关(相关系数–0.474)。W 基质的吸水量与 X_1 正相关(相关系数 0.851), 与 X_2 和 X_3 负相关(相关系数–0.664, –0.682)。

3 讨论

3.1 粒径对基质容重的影响

容重是影响植物基质栽培的重要物理参数, 基质容重与其自身质地和颗粒大小关联度大, 其大小反映了基质的疏松、紧实程度和持水、通气能力[12]。在现有的国标和行业标准中, GB/T 33891-2017 规定基质

表 7 不同粒径组合基质吸水量(单位 mL)

Table 7 Adsorption water volume of different size combinations of substrates (Unit mL)

Combinations	P	B	W	V
1	35.33±2.52 a A	26.67±7.77 cde AB	18.67±3.06 b B	—
2	36.67±1.15 a A	33.67±1.53 ab A	24.67±3.06 a B	—
3	37.00±2.00 a A	37.67±4.51 a A	25.00±2.65 a B	—
4	18.33±0.58 e A	18.33±0.58 f A	15.33±1.15 bc B	—
5	26.67±1.15 d A	27.33±3.06 bcde A	15.33±3.06 bc B	—
6	30.67±3.06 bc A	32.00±.00 abc A	22.67±1.53 a B	—
7	31.33±1.15 b A	32.67±2.08 abc A	22.67±1.15 a B	—
8	21.33±1.15 e A	24.67±4.16 def A	14.33±1.53 c B	—
9	27.33±1.15 d A	23.00±5.57 ef AB	16.67±2.31 bc B	—
10	29.00±3.61 bcd A	30.33±3.21 bcd A	17.33±1.15 bc B	—
Average	29.37±1.75 B	28.63±3.25 B	19.27±2.06 C	37.00±2.65 A*

注 每一栏内标注相同小写字母表示不同组合之间无显著性差异(p < 0.05), 每一行内标注相同大写字母表示同一组合不同基质之间无显著性差异(p < 0.05), 重复数n = 3, *表示1～2 mm 粒径蛭石的吸水量(即组合0-100-0)。

的容重范围为 0.10～1.00 g·cm^{-3}, NYT2118-2012 标准则规定育苗基质的容重范围为 0.20～0.60 g·cm^{-3}。容重过大, 基质过于紧实, 持水性较好, 但通气性较差; 容重过小, 基质过于疏松, 通气性较好, 有利于根系下扎, 但持水性较差, 易干, 且固定植株的效果较差。

本研究中, 3 种基质(P/B/W)的容重均随<1 mm 粒径比例的增加而增加(见表 3), 这表明增加小粒径基质颗粒占比, 不同组合基质的容重也显著增加。基质容重不仅与基质材料相关, 还与基质颗粒大小密切相关。对几种基质的容重进行比较, 其中 P 基质和 B 基质容重相当, 约为 0.7 g·cm^{-3}, W 基质容重较大(>1.0 g·cm^{-3}), V 基质容重约 0.4 g·cm^{-3}。此外, 在资源有限的空间, 容重较小的栽培基质有利于节约资源, 但需同步考虑其固持植物能力。参考已开展的相关研究 [7–10], 空间植物栽培基质的容重范围一般为 0.3～0.8 g·cm^{-3}。因此, P 基质和 B 基质的容重比较适合在空间培养植物, V 基质适合较小植物或植物幼苗培养, W 基质的容重过大。

3.2 粒径对基质孔性的影响

基质的孔性参数包括总孔隙度、持水孔隙度、通气孔隙度和气水比等。总孔隙度反映了基质的孔隙状况, 孔隙度大说明基质疏松, 容纳空气和水的量大, 有利于根系生长。因此, 孔隙度需要合理控制在一定范围内, 一般要求孔隙度在 54%～96%, 这比较适合多数作物栽培 [12]。W 基质容重较大, 导致其不同粒径组合基质的总孔隙度普遍偏小, 均值约为 50%。P 基质和 B 基质总孔隙度均大于 60%。V 基质容重最小, 其总孔隙度最大(约 70%)。因此, 从总孔隙度角度考虑, 空间植物栽培时宜选择 V 基质、P 基质和 B 基质。

持水孔隙度、通气孔隙度和气水比则反映基质中容纳水分和空气的能力和比值。研究表明, 增加小颗粒基质(<1 mm)的含量有利于增加持水孔隙度, 以便基质能够储存更多水分, 但相应也会减少容纳空气的孔隙。其中 P 基质和 V 基质 WHP 较高, 具有较高的贮藏水分的能力。B 基质和 W 基质的微孔占比较少, 持水能力相对较弱, 但是可以通过增加细小颗粒占比提高其储存水分的能力。此外, 在空间培养植物, 还需要栽培基质具有良好的透气性(AP)。当根部氧气不足时, 需要进行强制通风 [8]。NY/T2118-2012《蔬菜育苗基质》规定, 育苗基质的气水比(WAR)为 1:(2～4)。本文中 4 种基质的气水比值均小于该标准要求, 这可能与这 4 种基质颗粒粒径(≯2.0 mm)均远小于农业生产中的基质颗粒粒径(≯20 mm)有关。

3.3 粒径对基质水吸力的影响

基质水吸力表征基质中水分承受一定吸附力情况下所表现的能态, 其值与水势值相等而符号相反, 包括基质吸力和渗透吸力两方面。通过测量基质吸水速率和吸水高度, 间接反映基质的水吸力, 同时通过测量其吸水数量反映基质容纳水分的能力。研究表明, 在同一种基质中, 小粒径颗粒(<1 mm)占比越高, 其吸水速率和吸水量均较高; 基质中 1～2 mm 粒径占比越高, 其吸水速率和吸水量则越低, 70% 占比的吸水速率最低。不同基质之间, V 基质具有最高的吸水速率和吸水量, P 基质和 B 基质相当, W 基质最小。这与基质的总孔隙度值相一致。

在空间微重力环境下, 水分在基质中的传导主要依靠基质毛细作用力(水吸力), 并且水分在基质中的分布及运移规律也与地面完全不同 [11]。基质水吸力的强弱直接体现其在空间微重力环境下为植物根系的导水能力, 导水能力强则可均匀输送水分至植物根部附近。此外, 在空间微重力环境下, 基质中的水气较地面更难达到平衡, 容易造成缺水致使植物干旱死亡, 或者水多造成植物根部缺氧影响根系生长。因此, 需要综合考虑基质既要为植物根系提供充足的水分, 又需要保证基质中空气含量满足根系呼吸需求。比较而言, P 基质和 B 基质具有适中的容重, 良好的孔性和水吸力, 可以作为空间植物栽培基质的备选材料。此外, 本研究主要考虑单一基质不同粒径配比对容重、孔性和水吸力的影响, 未来还需要开展不同基质不同粒径配比的研究, 以便融合不同基质的优良特性, 研制或筛选更加适应空间环境且满足植物生长需要的复合基质。

4 结论

通过对 4 种栽培基质 10 种粒径组合的基本特性、容重、孔性和水吸力性能进行研究, 得到如下结论。

(1) B 基质酸碱度偏高, 需要调节后使用。P 基

质含有较多矿质养分离子。

(2)增加小粒径基质颗粒占比显著增加了不同组合基质的容重。P/B 基质的容重适中(约 0.70 g·cm^{-3})。

(3)不同组合基质的 TP 和 WHP 随小粒径基质颗粒占比增加而增加,但 AP 下降。P7(40-60-0),B8(10-70-20)和 W4(10-60-30)具有最高的 TP 值,P8(10-70-20),B1(20-50-30)和 W8(10-70-20)则具有最高的 WAR 值。V 和 P 基质的平均 TP 显著高于 B 和 W 基质。

(4)基质水分的吸附上升速度随 <1 mm 粒径基质的占比增加而增加。P3(50-50-0),B3(50-50-0)和 W7(40-60-0)分别具有最高吸水速率,P3(50-50-0),B3(50-50-0)和 W3(50-50-0)具有最高吸附水量。基质的吸水高度和吸水量大小顺序为 V>B>P>W 和 V>P>B>W。综合比较,P3(50-50-0)基质和 B7(40-60-0)基质具有适中的容重、良好的孔性和较高的水吸力,适合用于空间植物栽培。

参考文献

[1] WHEELER R M, STUTTE G W, YORIO N C, *et al*. Plant growth and human life support for space travel[R]. In: PESSARAKLI M (ed), Handbook of Plant and Crop Physiology, 2 nd ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2001, 925-941

[2] ZABEL P, BAMSEY M, SCHUBERT D, *et al*. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2016, **10**: 1-16

[3] MORROW R C, RICHTER, R C, TELLEZ G. A new plant habitat facility for the ISS[R]. 46th International Conference on Environmental Systems, Vienna, Austria. 2016, No. ICES–2016-320

[4] CHEN Yu, LU Jinying, LI Huasheng, *et al*. Experiments of tomato plantlet flowering and fructification in space and simulated microgravity environments[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2013, **26**(3): 239-242 (陈瑜, 鹿金颖, 李华盛, 等. 空间环境和模拟微重力环境下番茄试管苗的开花结实实验[J]. 航天医学与医学工程, 2013, **26**(3): 239-242)

[5] TANG Yongkang, WU Zhiqiang, DONG Wenping, *et al*. Analysis and review on plant cultivation techniques in space[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, **56**(1): 1-10 (In Chinese (唐永康, 吴志强, 董文平, 等. 空间植物栽培技术分析与思考[J]. 植物生理学报, 2020, **56**(1): 1-10)

[6] HOEHN A, SCOVAZZO P and STODIECK L S. Microgravity root zone hydration systems[R]. SAE Technical Paper Series, 2000, 2000-01-2510

[7] STEINBERG S L, KLUITENBERG G J, JONES S B, *et al*. Physical and hydraulic properties of baked ceramic aggregates used for plant growth medium[J]. *Journal of the American Society for Horticulture Science*, 2005, **130**(5): 767-774

[8] SHEN Y Z, GUO S S, ZHAO P S, *et al*. Research on lettuce growth technology onboard Chinese Tiangong Ⅱ Spacelab[J]. *Acta Astronautica*, 2018, **144**: 97-102

[9] GUO Shuangsheng. Selection of root-zone media for higher plant cultivation in Space[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2004, **17**(2): 93-97 (郭双生. 空间高等植物栽培根部基质的筛选研究[J]. 航天医学与医学工程, 2004, **17**(2): 93-97)

[10] ADAMS C, JACOBSON A, BUGBEE B. Ceramic aggregate sorption and desorption chemistry: implications for use as a component of soilless media[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, **37**: 1345-1357

[11] GAO Jian, TANG Yongkang, WU Zhiqiang, *et al*. Selections and effects of substrates on lettuce growth in CELSS[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2020, **33**(5): 440-448 (高坚, 唐永康, 吴志强, 等. 空间栽培基质筛选及对莴苣生长的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2020, **33**(5): 440-448)

[12] QIN Xinhui. Soilless Cultivation Techniques[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2016: 46-48 (秦新惠. 无土栽培技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2016: 46-48)