

调节粒径分布提高月壤种植潜力研究

韩 娅^{1,2}, 谢更新^{1,2*}, 晏 铭³, 晏卓逸^{1,2}, 丁靖航^{1,2}, 熊 鑫^{1,2}, 武丽萍^{1,2}

(1 重庆大学环境与生态学院, 重庆 400044; 2 重庆大学教育部深空探测联合研究中心, 重庆 400044;
3 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南长沙 410012)

摘要:【目的】月壤是月球岩石在遭受物理风化作用后形成的颗粒极细的碎屑物质, 其保肥能力和透气性较差, 且缺乏植物生长所需的有机养分及营养元素, 并不是一种优质的栽培基质。通过研究月壤物理结构调整对月壤原位资源化利用的可行性, 为太空农业种植提供有效手段。【方法】本研究基于嫦娥五号 (CE-5) 取回的月壤样本组分数据, 选用玄武岩制备模拟月壤。根据嫦娥 5 号和 Apollo 飞船的月壤样本粒径分布数据, 在月壤粒径分布合理的范围内, 分别添加质量百分数为 10%、20% 和 30% 的大粒径玄武岩颗粒 (1000~500 μm), 形成了 3 个模拟月壤 M1、M2 和 M3, 以 CE-5 真实月壤粒径分布的模拟月壤 M0 作为对照, 向模拟月壤中加入氮、磷、钾营养元素, 进行生菜种植试验和室内模拟淋溶试验。【结果】随着大粒径颗粒占比的增加, 模拟月壤容重从 M0 的 1.85 g/cm^3 减小至 M3 的 1.80 g/cm^3 , 田间持水量下的通气孔隙度从 7.62% 上升至 11.68%, M3 的通气孔隙度达到 M0 的 153.38%。室内模拟淋溶试验显示, 随着大粒径颗粒占比的增加, 淋溶液中的铵态氮、全氮和全磷均呈先下降后上升的趋势, 即保肥效果随着大粒径颗粒占比的增加呈先上升后下降的趋势, 以 M2 保肥性能最好, 渗滤液中的铵态氮和全氮淋失量分别比 M0 低 58.10% 和 21.67%。M2 处理的生菜生长状况也相对最好, 地上和地下部分干重分别高于 M0 97.60% 和 39.20%。【结论】通过向模拟月壤中添加大粒径颗粒来优化其粒径分布, 可改善模拟月壤的物理结构特性, 增大通气孔隙度, 降低容重, 提高其保肥能力及种植潜力, 以 M2 模拟月壤的保肥效果及生菜生物量最佳, 可以最大限度的实现月壤资源的原位化利用。

关键词: 模拟月壤; 粒径分布; 保肥能力; 种植潜力; 原位资源化利用

Improving planting potential of lunar soil by adjusting grain size distribution

HAN Ya^{1,2}, XIE Geng-xin^{1,2*}, YAN Ming³, YAN Zhuo-yi^{1,2}, DING Jing-hang^{1,2}, XIONG Xin^{1,2}, WU Li-ping^{1,2}
(1 College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2 Chongqing University Ministry of Education Deep Space Exploration Joint Research Center, Chongqing 400044, China; 3 College of Environmental Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410012, China)

Abstract: 【objectives】Lunar soil is generated by the fine rock debris under physical weathering, the low aeration porosity and lack of organic matter make it unsuitable for planting. Improving the physical properties of lunar soil would provide a crucial tool to realize the In-Situ Resource Utilization (ISRU) of lunar soil for the space agriculture race. 【Methods】Based on the composition data of lunar soil samples retrieved from the lunar probe Chang'e-5, basalt was used to prepare simulated lunar soil (M0). Referring the particle size distribution data of lunar soil samples from Chang'e-5 and Apollo, soil groups, M0, M1, M2 and M3 were prepared by adding 0, 10%, 20% and 30% (wt) of basalt particles (1000–500 μm in size). N, P, and K nutrients were added into the simulated soils to carry out lettuce planting and laboratory leaching experiments. 【Results】With the increased addition of large size particles (M0, M1, M2, and M3), the bulk density of lunar soil decreased from 1.85 to 1.80 g/cm^3 , aerated porosity at field moisture capacity increased from 7.62% to 11.68%. With the increase of large particle proportion in the simulated soils, the NH_4^+ , total N and total P in the leachate decreased first and then increased, in other words, the nutrient holding capacity increased first and then decreased. The lowest NH_4^+

收稿日期: 2023-03-06 接受日期: 2023-08-27

基金项目: 装备预研教育部联合基金项目 (8091B010103)。

联系方式: 韩娅 E-mail: 1752690462@qq.com; * 通信作者 谢更新 E-mail: xiegengxin@cqu.edu.cn

and total N were determined in the leachate of M2, which were 58.10% and 21.67% lower than those in M0. In addition, the lettuce grew best in M2, the dry weight of above- and under-ground parts was 97.60% and 39.20% higher than those of M0, respectively. 【Conclusions】 Adding large-size particles to simulated lunar soil can improve its physical structure, increase aeration porosity, reduce bulk density, thus improve its fertilizer retention capacity and planting potential. The primary addition ratio of large particles is 20% for the in-situ use of lunar soil.

Key words: simulated lunar soil; size grading; nutrient retention capacity; planting potential; In-Situ Resource Utilization

随着我国嫦娥五号 (CE-5) 成功取回月球土壤样本, 国内掀起了对月壤研究的热潮^[1-3]。月壤改良可种植技术作为月球原位资源利用 (In-Situ Resource Utilization, ISRU) 的重要部分, 能够减少未来月球基地建设的资源消耗, 受到了越来越多的关注。然而, 由于月面缺乏大气, 月壤未经历过地球土壤的风化成土过程, 具有粒径小、孔隙率低、容重高^[4]、持水性差^[5]、不含有机质等特性, 月壤内的尖锐颗粒还会划伤植物的根系^[6]。直接使用月壤或其模拟物进行种植会对植物产生不利影响, 主要表现为种子活力降低^[7]、生长延缓^[8]、株高降低且叶片变薄^[9], 表现出严重的胁迫形态^[10]。

受制于真实月壤的稀缺性, 目前绝大多数的改良种植研究都是使用模拟月壤, 其化学性质和部分物理性质同真实月壤相似^[11]。提高月壤的种植潜力除了需要增加其生物有效性, 还要改善其物理性质。当前研究主要集中在向月壤及其模拟物内加入植物残体^[12]、菌剂^[13-14]、粪肥等^[15], 利用生物风化作用提高月壤的可种植性。对于月壤的物理性质如容重、孔隙度、持水保肥能力的改良研究还较少。土壤基质的粒径分布决定其容重、孔隙度、保水率、和渗透率等诸多物理性质特征^[16-17], 植物的生长与基质的理化性质息息相关, 基质的物理性质不同, 对植物的生长及根系发育均会产生影响^[18-19]。黄梓恩等^[20]通过人为调控泥炭颗粒粒径配比显著调整了育苗基质的孔隙特性和育苗效果。李炎艳等^[21]发现适宜的珍珠岩粒径配比可改善基质的容重、孔隙度、电导率 (EC) 值等理化性质, 提供适宜的根区环境, 促进番茄的生长。马柳^[22]将不同粒径的煤矸石进行配比, 研究发现粒径级配能够不同程度地改良煤矸石土壤基质的理化性质, 显著提高种植生菜的出苗率和生物量, 其最高出苗率为对照组的 155%, 最大整株鲜重与干重分别为对照组的 322% 和 532%。通过粒径配比直接对模拟月壤的粒径分布进行改良, 与生物改良方法相比具有操作简单、见效快的优点, 非常适合于月壤的前期改良。

本研究制备了用于改良种植研究的模拟月壤,

还原了真实月壤的元素组成、矿物成分、粒径分布、容重、孔隙度等特征。之后通过粒径对比对模拟月壤进行了改良, 探究了模拟月壤粒径分布与其容重、孔隙度、持水保肥能力的关系。最后, 还进行了模拟月壤的生菜盆栽试验并评价了改良效果。通过本研究实现了对月球土壤改良的相关技术储备, 对于未来月壤资源原位利用具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 模拟月壤的制备 模拟月壤制备原料为黑色块状玄武岩 (图 1), 产地为吉林省通化市辉南县。将块状玄武岩用破碎机破碎后依次用 1000、500、250、150 和 75 μm 的筛网进行筛分, 共筛分出 18~35 目 (1000~500 μm)、35~65 目 (500~250 μm)、65~100 目 (250~150 μm)、100~200 目 (150~75 μm) 和 >200 目 (<75 μm) 的 5 种不同粒径范围的玄武岩颗粒。最后按照中国 CE-5 带回的真实月壤样品粒径分布进行配比^[1] (表 1)。

使用 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析 M0 模拟月壤的化学元素组成 (表 2), 结果以氧化物表示。其 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 、 MgO 及 P_2O_5 的含量与真实月壤及其它月壤模拟物的含量相近, Na_2O 和 K_2O 的含量与 CE-5^[1]、Apollo11^[28]、Apollo16 和 Apollo17^[27] 等真实月壤的含量相差较大, 但与约翰航天中心 JSC-1^[29] 和中国科学院 CAS-1^[11] 月壤模拟物相近。使用 X 射线衍射 (XRD) 分析了 M0 模拟月壤的衍射图谱 (图 2), 通过 JADE 软件拟合检索物相, 结果显示其主要物相为斜长石 (40.3%) 和透辉石 (36.9%), 与 CE-5 的矿物组成^[1] 相似。

1.1.2 不同模拟月壤组的制备 根据 CE-5 和 Apollo 的月壤样本, 研究其粒径分布, 发现 500~250 和 250~150 μm 2 种粒径在月壤中质量占比各为 10% 左右, 而 150~75 μm 和 <75 μm 2 种粒径的质量占比在月壤中以 1:3 的比例存在。根据这一规律, 我们将 150~75 μm 和 <75 μm 2 种粒径按照 1:3 的比例进行

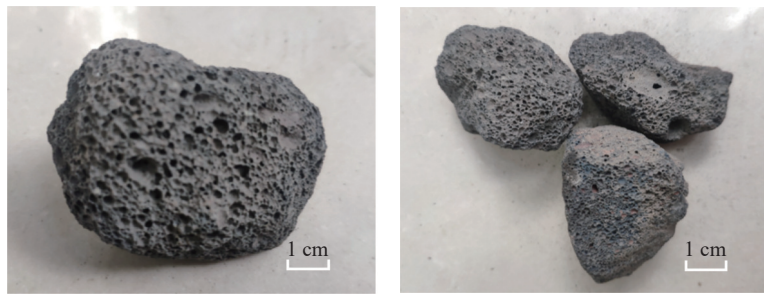


图 1 块状玄武岩
Fig. 1 Massive basalt

表 1 月壤样本真实粒径分布

Table 1 The particle size distribution of real lunar soil samples

月壤样品 Lunar soil sample	颗粒比例 Particle ratio (% , wt)								加权平均 (%) Weighted average
	1000~500 μm	500~250 μm	250~150 μm	150~90 μm	90~75 μm	75~45 μm	45~20 μm	<20 μm	
①		11.91	13.13	15.99	5.48	14.45	17.37		78.33
②	3.44	7.08	7.04	8.66	3.00	8.39	12.21	17.98	67.80
③		8.90	8.20	10.00	3.50	10.00	15.60		56.20
④		8.55	8.37	11.02	4.01	12.00	18.79	25.84	88.58
⑤		7.95	11.87	14.07	5.12	14.18	20.41	25.45	99.05

注: ①Apollo 15601月壤 (90%月海玄武岩土壤)^[23-25]; ②Apollo 71061月壤 (典型月海玄武岩土壤)^[23-25]; ③Apollo 64501月壤^[23, 26-27]; ④Apollo 72441月壤^[23-24]; ⑤嫦娥5号月壤(月海玄武岩土壤)^[1]
Note: ① Apollo 15601 soil (90% lunar basalt soil)^[23-25]; ② Apollo 71061 soil (typical lunar basalt soil)^[23-25]; ③ Apollo 64501 soil^[23, 26-27]; ④ Apollo 72441 soil^[23-24]; ⑤ Lunar soil brought by Chang'e-5 (lunar basalt soil)^[1]

表 2 模拟月壤与真实月壤的化学组成 (% , wt)

Table 2 Chemical composition of simulated and real lunar soil

组成 Composition	M0	CE-5	Apollo11	Apollo16	Apollo17	JSC-1	CAS-1
SiO ₂	41.60	42.20	42.20	45.10	43.20	47.71	49.24
TiO ₂	3.52	5.00	7.80	0.54	4.20	1.59	1.91
Al ₂ O ₃	13.18	10.80	13.60	27.30	17.10	15.02	15.80
FeO	17.88	22.50	15.30	5.10	12.20	10.79	11.47
MnO	0.26	0.28	0.20	0.30	0.17	0.18	0.14
MgO	5.06	6.48	7.80	5.70	10.40	9.01	8.72
CaO	10.36	11.00	11.90	15.70	11.80	10.42	7.25
Na ₂ O	3.75	0.26	0.47	0.46	0.40	2.70	3.08
K ₂ O	2.74	0.19	0.16	0.17	0.13	0.82	1.03
P ₂ O ₅	0.76	0.23	0.05	0.11	0.12	0.66	0.30
总量 Total	99.11	98.94	99.48	100.48	99.72	98.90	98.94

混合, 得到<150 μm 的混合粒径。然后控制 500~250 和 250~150 μm 2 种粒径的质量占比各为 10%, 调节 1000~500 μm 和<150 μm 的混合颗粒的质量占比, 配制出另外 3 种不同粒径配比的新型月球土壤模拟物 M1、M2 和 M3 (表 3), M0 为 CE-5 真实月壤粒径分布。

1.2 试验方案

1.2.1 模拟月壤理化性质试验 以下所有试验均设计 4 个处理, 分别为 M0 空白对照和 M1、M2、M3 处理, 每各处理设 3 个重复。月壤模拟物物理性质测量包括容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度及水气比。容重采用环刀法进行测量, 总孔隙

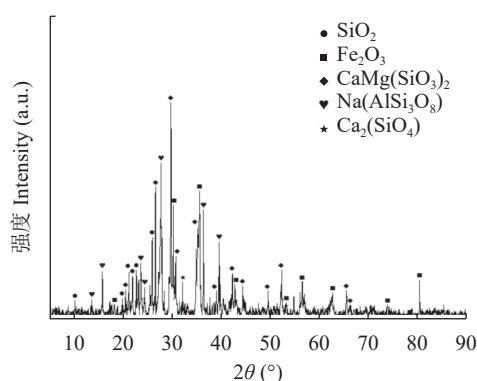


图2 月球土壤模拟物 M0 的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of lunar soil simulator M0

表3 月球土壤模拟物粒径配比表

Table 3 Mass ratio of particle sizes in simulated lunar soils simulators

处理 Treatment	粒径质量占比 Particle mass ratio (%)			
	1000~500 μm	500~250 μm	250~150 μm	<150 μm
M0	0	8	12	80
M1	10	10	10	70
M2	20	10	10	60
M3	30	10	10	50

度、持水孔隙度及通气孔隙度用计算法。化学性质测量包括电导 EC 和 pH。使用环刀法测量模拟月壤的各项物理指标, 先将配制好的不同粒径级配月球土壤模拟物各称取 660 g 置于花盆中, 按照最大持水量将去离子水灌入花盆中, 放置两天使花盆中的月球土壤模拟物沉实。再用已知容积 V 和质量 $W1$ 的环刀(带盖)将花盆中的月球土壤模拟物取出, 盖上盖子, 水中浸泡 48 h, 取出称重 $W2$; 然后倒置在干燥的细沙上 12 h, 直至环刀内的自由水流出, 称重 $W3$; 最后放入烘箱, 烘至恒重并称重 $W4$ 。按表 4 公式计算容重和孔隙度; 土壤 pH 采用铵态水土比 (2.5 : 1) 浸提法测定 (NY/T 1377—2007), EC 值采用 (5 : 1) 浸提法测定 (NY/T 1121.16—2006)。

1.2.2 室内模拟淋溶试验 模拟淋溶试验见图 3。将配置好的模拟月壤实验组分别称取 330 g 放入高 15 cm 内径 8 cm 的 PVC 管中, 每个 PVC 管底部加 2 层 0.075 mm (200 目) 滤布, 进行室内模拟淋溶试验^[30]。将去离子水按照土壤最大持水量灌入 PVC 管中, 静置 2 天, 使 PVC 管中的模拟月壤沉实。第 3 天在每个基质中添加 N 0.15 g/kg、P 0.05 g/kg 和 K 0.12 g/kg 作为底肥, 底肥以溶液形式添加 (配置溶液的浓度为尿素 5.31 g/L、磷酸二氢钾 1.58 g/L、硫酸钾 2.66 g/L, 每个基质施入 20 mL)。施肥完成后静

置 2 h, 在每个基质中加入 30 mL 去离子水, 同时收集渗滤液作为第一次淋溶。5 天后, 加入 50 mL 去离子水, 进行第二次淋溶并同时收集渗滤液, 以后每 5 天按同样操作淋溶 1 次, 共淋溶 4 次。将收集的渗滤液先用量筒量其体积, 再将其经 0.45 μm 有机微孔膜过滤, 过滤后的水样进行铵态氮、全氮和全磷浓度的测定, 计算其淋失量。铵态氮采用纳氏试剂比色法 (HJ 535—2009); 全氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法 (HJ 636—2012); 全磷采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法 (GB 11893—89)。

1.2.3 生菜盆栽试验 将配置好的不同模拟月壤组各称取 330 g 置于高 10 cm、内径 6 cm 的花盆中, 花盆底部加两层 0.075 mm (200 目) 滤布。按照最大持水量 (透水) 将去离子水灌入花盆中, 放置 2 天使花盆中的月球土壤模拟物沉实。种子选用意大利全年生菜王生菜, 播种前将供试的生菜种子用去离子水清洗 3 遍, 挑选饱满均一的种子放入去离子水中浸泡 8 h 后取出, 放入铺好 2 层无菌湿润纱布的培养皿中, 每个培养皿均匀放置 200 粒生菜种子, 盖上盖子, 将培养皿放入 20℃ 的人工气候箱中在黑暗条件下进行催芽^[31-32]。在此期间不断补充水分以保持纱布湿润, 直至生菜种子发芽率达到 80%, 将发芽的生菜种子播种于不同模拟月壤组中, 每盆播种 6 粒生菜种子, 深度约 1~1.5 cm, 浇透水。随后将盆栽置于昼/夜温度为 23℃/20℃ 人工气候箱中并随机摆放, 期间保持基质湿润, 待生菜长到三叶一心时期进行疏苗定植, 每盆留 2 株长势相当的生菜苗。定植完成 24 h 后开始施肥, 每盆基质中添加 N 0.15 g/kg、P 0.05 g/kg 和 K 0.12 g/kg 作为底肥 (与土柱淋溶试验所施底肥相同, 均用浓度为尿素 5.31 g/L、磷酸二氢钾 1.58 g/L、硫酸钾 2.66 g/L 的溶液添加, 每个基质

表4 土壤物理性质计算方法

Table 4 Calculation methods of soil physical properties

测量指标 Indicator	计算方法 Method of calculation
容重 Bulk density (BD, g/cm ³)	$(W4 - W1)/V$
总孔隙度 Total porosity (TP, %)	$(W2 - W4)/V \times 100$
通气孔隙度 Aeration porosity (AP, %)	$(W2 - W3)/V \times 100$
持水孔隙度 (WHP, %)	总孔隙度 - 通气孔隙度
Water holding porosity	TP - AP
水气比 WHP/AP	持水孔隙度/通气孔隙度
	WHP/AP

注: $W1$ ~ $W4$ 为模拟月壤M1~M4的重量, V 为取样体积。

Note: $W1$ — $W4$ are the weights of prepared lunar soil samples M1—M4, V is the sampled volume.



图 3 模拟淋溶实验装置图

Fig. 3 Device of simulated eluviating experiment

施入 20 mL), 后面不再追肥。每盆生菜每 2 天定量施加 20 mL 去离子水, 待生菜长到 55 天后进行收割。不同模拟月壤组生菜从三叶一心时期开始生长 45 天的生长状况见图 4。

盆栽试验测量指标包含: 株高、叶面积、叶宽、叶片数、茎粗、植物地上部分鲜重、地下部分鲜重、地上部分干重、地下部分干重和根系活力。待生菜长到 55 天后, 先用软尺测量生菜株高; 用游标卡尺测量叶宽和茎粗, 叶宽测量部位为生菜由内往外数第五片叶片最宽处; 茎粗测量部位为植物地上部分茎的最宽处; 叶片数用计数法; 用剪刀将植物地上部分与根部剪开, 然后将根系拔出用水清洗并擦干, 分别用分析天平称重; 地上部分干重则是先将其放入烘箱内 105℃ 杀青 0.5 h, 再在 80℃ 下和根系一起烘干至恒重, 用分析天平称量。根系活力采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法测定^[33]。

1.3 统计分析

数据经 Excel 处理后, 使用 SPSS 22.0 软件进行方差分析, 采用 LSD 检验法进行多重比较, 利用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同模拟月壤组的理化性质

模拟月壤理化性质测定结果如表 5 所示, 随着大粒径占比的增加, 模拟月壤的容重、持水孔隙度、水气比和电导率呈递减趋势, 其中 M3 的容重最小, 为 1.80 g/cm³, 低于对照 2.70%; 而持水孔隙度、水气比和电导率也均以 M3 处理最小, 分别低于对照组 6.75%、38.66% 和 18.18%。总孔隙度和通气孔隙度呈递增趋势, 均以 M3 处理最大, 分别高于对照组 3.96% 和 53.38%。

粒径分布是表征土壤结构和生产力的重要物理指标, 它决定着土壤基质的容重、孔隙度等诸多物理性质特征^[16-17]。适合农作物生长的耕层土壤容重一般在 1.2 g/cm³ 左右, 总孔隙度为 50%~56%, 通气孔隙度>10%, 电导率为 0.2~0.6 ms/cm, pH 为 6.5~7.5^[34]。本研究将模拟月壤不同大小的粒径颗粒根据真实月壤粒径进行调配, 力求在合理的月壤粒径范围内探究最佳模拟月壤粒径配比, 实现月壤原位资源利用。模拟月壤除通气孔隙度、水气比和电

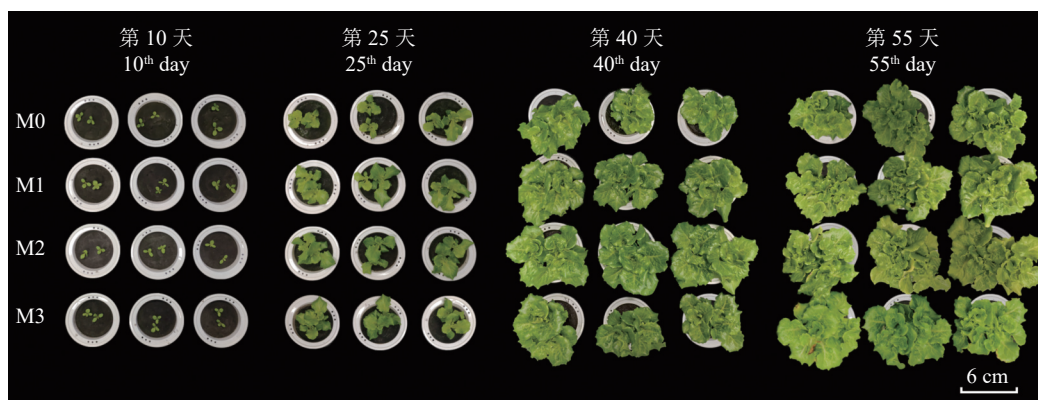


图 4 生菜在模拟月壤中的生长状况

Fig. 4 Lettuce growth in the simulated lunar soils

注: M0 为模拟 CE-5 月壤真实粒径分布, M1、M2、M3 分别为大粒径颗粒占比 10%、20%、30% 的模拟月壤。

Note: M0 is a simulated lunar soil with the same particle size distribution as real CE-5 lunar soil; M1, M2, and M3 are simulated lunar soils with the mas ratio of large size particles of 10%, 20%, and 30%, respectively.

表 5 不同模拟月壤的理化性质

Table 5 Physical and chemical properties of different simulated lunar soils

处理 Treatment	容重 (g/cm ³) BD	总孔隙度 (%) TP	通气孔隙度 (%) AP	持水孔隙度 (%) WHP	水气比 WHP/AP	pH	电导率 (ms/cm) EC
M0	1.85±0.02 a	42.88±1.13 a	7.62±0.05 b	35.27±1.08 a	4.63±0.11 a	8.68±0.11 a	0.11±0.002 a
M1	1.84±0.01 a	43.30±0.58 a	8.15±1.25 b	35.15±1.83 a	4.45±0.91 a	8.57±0.03 a	0.10±0.002 b
M2	1.81±0.01 a	44.16±0.63 a	10.73±1.14 ab	33.43±1.77 a	3.17±0.52 ab	8.66±0.01 a	0.10±0.001 b
M3	1.80±0.01 a	44.58±0.78 a	11.68±1.03 a	32.89±0.26 a	2.84±0.27 b	8.64±0.01 a	0.09±0.001 c

注: M0为模拟CE-5月壤真实粒径分布, M1、M2、M3分别为大粒径颗粒占比10%、20%、30%的模拟月壤。数值为“平均值±标准误差”, 同列数据后不同小写字母表示4个模拟月壤间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: M0 is a simulated lunar soil with the same particle size distribution as real CE-5 lunar soil; M1, M2, and M3 are simulated lunar soils with the mass ratio of large size particles of 10%, 20%, and 30%, respectively. BD—Bulk density; TP—Total porosity; AP—Aeration porosity; WHP—Water holding porosity; EC—Electrical conductivity. The value is “mean ± standard error”, and different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among the four simulated lunar soils ($P<0.05$).

导率值与对照组有显著差异外, 其他的物化性质均没有表现出显著差异。调节模拟月壤粒径配比不能显著改变模拟月壤组的 pH, 但电导率随着大粒径占比的增加有显著降低, 表明减少小粒径颗粒占比可以降低模拟月壤可溶性盐的水平。通过提升大粒径在模拟月壤中的占比, 模拟月壤的容重、总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度等均得到不同程度的改善, 其中 M3 处理通气孔隙度 (AP) 得到的改善最为显著, 其次是 M2 处理, 分别为对照组的 153.38% 和 140.81%。

2.2 不同模拟月壤的保肥效果

对模拟月壤进行室内模拟淋溶试验, 探究不同

粒径模拟月壤组的保肥效果, 共进行 4 次淋溶, 每次淋溶液中的铵态氮、全氮和全磷淋失量如图 5 所示。随着大粒径占比的增加, 4 次淋溶液中累计铵态氮、全氮和全磷淋失量均呈先下降后上升的趋势。

相较于 M0 对照, M1、M2 和 M3 3 个处理 4 次淋溶累积铵态氮淋失量均有所减小, 其中 M2 淋溶液中铵态氮淋失量最低, 为 0.19 mg, 显著降低 58.10%。不同粒径分布模拟月壤全氮淋失量变化特征与铵态氮的淋失相似, 相较于 M0 对照, M1、M2 和 M3 处理中 4 次淋溶累积全氮淋失量均有所降低, 其中 M2 最低, 为 4.33 mg, 显著降低 21.67%。对比不同粒径分布模拟月壤全磷淋失量, 4 次淋溶累积全磷淋

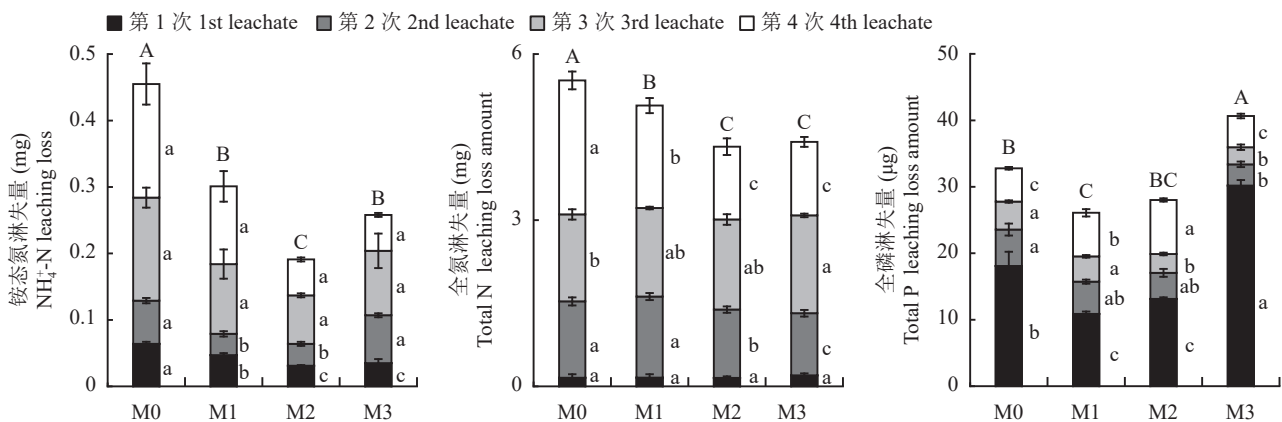


图 5 模拟月壤 4 次淋洗液中的养分淋失量及总淋失量

Fig. 5 Nutrient leaching loss in the four leachate and the total leaching loss of simulated lunar soils

注: M0 为真实粒径分布的 CE-5 模拟月壤, M1、M2、M3 分别为大粒径颗粒质量占比为 10%、20%、30% 的模拟月壤。柱旁不同小写字母表示 4 个模拟月壤同一顺序淋洗液中养分淋失量间差异显著 ($P<0.05$); 柱上不同大写字母表示 4 个模拟月壤总养分淋失量间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: M0 is a simulated lunar soil with real particle size distribution of CE-5 lunar soil; M1, M2, and M3 are simulated lunar soils with the mass ratio of large size particles of 10%, 20%, and 30%, respectively. Different small letters beside the bars indicate significant difference in nutrient leaching loss in the leachate among the four simulated lunar soils ($P<0.05$), and different capital letters above the bars indicate significant difference in the total nutrient loss among the four simulated lunar soils ($P<0.05$).

失量 M3 为 $40.65\ \mu\text{g}$, 较 M0 显著增加 23.97%, M1 为 $26.09\ \mu\text{g}$, 较 M0 显著减小 20.43%。说明适当增大模拟月壤中大粒径颗粒占比可以减少铵态氮、全氮和全磷的淋失, 这可能是因为玄武岩材料本身的特殊性, 玄武岩具有大量的气孔状构造, 在小粒径颗粒中这些气孔状构造遭到破坏, 而在大粒径颗粒中这种构造得以保存下来, 当氮磷进入气孔中不容易随水流失, 使其得以保存下来。但大粒径颗粒含量过多 (如 M3) 则会造成孔隙度过大, 反而使氮磷淋失量增加。

在 4 次淋溶中, 第 1 次淋溶磷的淋失量均大于后 3 次磷的淋失量。磷的淋失量与铵态氮和全氮的淋失量规律相反, 铵态氮和全氮每次淋溶的淋失量是随着淋溶次数的增加呈显著的增加趋势, 而全磷则是呈现出下降趋势。说明在淋溶前期, 模拟月壤对铵态氮和全氮的保持效果明显要高于对全磷的保持效果, 但随着淋溶次数的增加, 模拟月壤对铵态氮和全氮的保持效果明显下降, 低于对全磷的保持效果。前人研究表明可以通过改变土壤的粒径配

比, 来改变土壤的物理性质和化学性质, 进而影响土壤的持水性和保肥性能^[35-37]。在本研究中模拟月壤 M1、M2 和 M3 通过改变不同大小粒径的占比, 从而改变其理化性质, 进而影响其持水性和保肥性。对照组 M0 的小粒径占比最大, 在经历 4 次淋溶试验后, 其保肥效果最差; M3 虽然细粒径占比是最少的, 但其大粒径占比过多, 导致其通气孔隙度过大, 持水孔隙度过低, 从而导致其养分的快速流失, 保肥效果也不好。根据本研究所得到的结果, M2 的渗滤液中铵态氮和全氮的淋失量是最低的, 全磷的淋失量则略高于 M1, 综合比较 M2 的保肥效果是最好的, 说明其对植株的生长是最为有利的, 这一结论在后续的生菜盆栽试验中也得到了证实。

2.3 不同模拟月壤对生菜的影响

基质是植物生长发育的基础, 植物的生长不仅受基质理化性质的影响, 也受基质保肥效果的影响。通过分析不同粒径模拟月壤上收割的生菜生长指标 (图 6), 发现改变模拟月壤的粒径配比, 可以显著的改变生菜的相关生长指标。研究发现, 随着

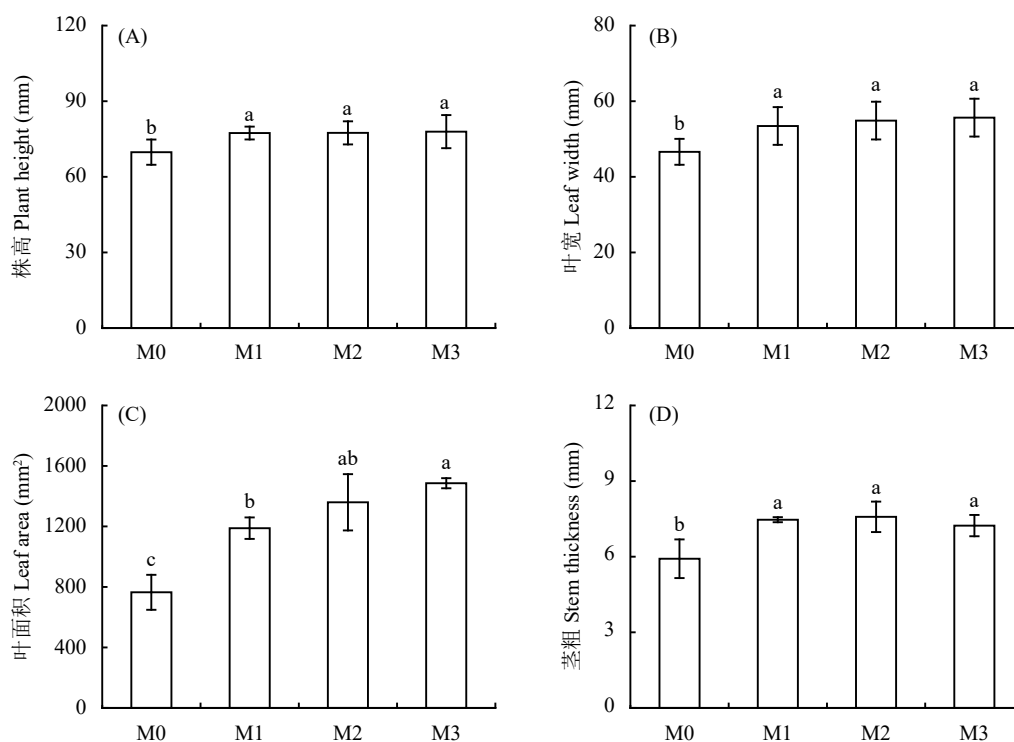


图 6 不同模拟月壤上生菜的农学指标

Fig. 6 Agronomic indices of lettuces grown in different simulated lunar soils

注: M0 为真实粒径分布的 CE-5 模拟月壤, M1、M2、M3 分别为大粒径颗粒质量占比为 10%、20%、30% 的模拟月壤。柱上不同小写字母表示 4 个模拟月壤之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: M0 is a simulated lunar soil with real particle size distribution of CE-5 lunar soil; M1, M2, and M3 are simulated lunar soils with the mass ratio of large size particles of 10%, 20%, and 30%, respectively. Different small letters above the bars indicate significant difference among the four simulated lunar soils ($P < 0.05$).

模拟月壤中大粒径占比的增加, 生菜的各项生长生理指标均表现出不同程度的增加趋势。M1、M2 和 M3 处理间株高、叶宽和茎粗无显著差异, 但均显著高于对照 M0; 叶面积随模拟月壤大粒径占比的提高而增加, M3 生菜叶面积为 1485.93 mm², 显著高于对照 94.33%。M2 叶面积与 M1、M3 的均无显著差异, 但显著高于 M0。

在模拟月壤中增加大粒径颗粒占比提高了生菜的生物量, M1、M2、M3 处理地上部分鲜重、干重均无显著差异, 鲜重均显著高于对照, 干重只有 M2 显著高于 M0; 地下部鲜重以 M1 处理最大, 显著高于其他 3 处理, 干重则以 M2 最大, 显著高于对照和 M3 处理 (图 7), M2 处理地上部分干重和地下部分干重分别较对照增加 97.60% 和 39.20%。4 个月壤处理间生菜根系活力均无显著差异 (图 8)。

综上所述, 改变模拟月壤粒径配比可以显著增

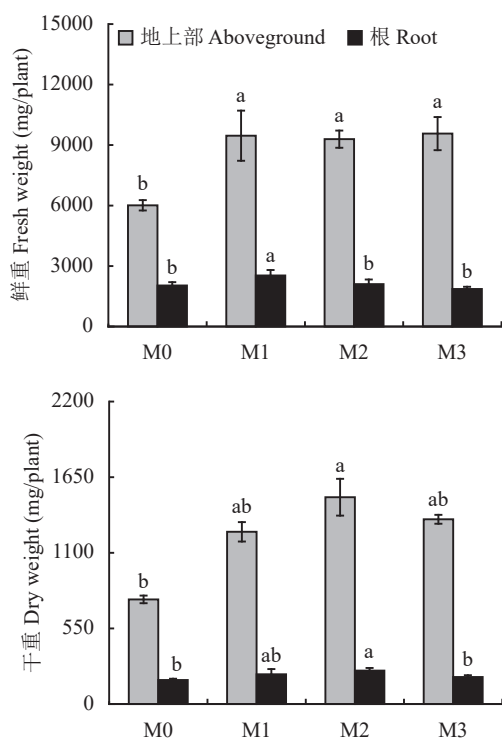


图 7 不同粒径模拟月壤上生菜生物量

Fig. 7 Lettuce biomass grown in simulated lunar soils with different particle sizes

注: M0 为 CE-5 真实月壤粒径分布的模拟月壤; M1、M2、M3 分别为大粒径颗粒质量占比为 10%、20%、30% 的模拟月壤。柱上不同小写字母表示 4 个月壤之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: M0 is a simulated lunar soil with real particle size distribution of CE-5 lunar soil; M1, M2, and M3 are simulated lunar soils with the mass ratio of large size particles of 10%, 20%, and 30%, respectively. Different small letters above the bars indicate significant difference among the four simulated lunar soils ($P < 0.05$).

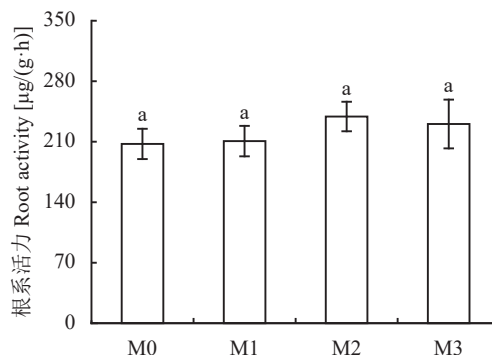


图 8 不同粒径模拟月壤上生菜根系活力

Fig. 8 Root activities of lettuce grown in simulated lunar soils with different particle sizes

注: M0 为 CE-5 真实月壤粒径分布的模拟月壤, M1、M2、M3 分别为大粒径颗粒质量占比 10%、20%、30% 的模拟月壤。柱上不同小写字母表示 4 个月壤之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: M0 is a simulated lunar soil with real particle size distribution of CE-5 lunar soil; M1, M2, and M3 are simulated lunar soils with the mass ratio of large size particles of 10%, 20%, and 30%, respectively. Different small letters above the bars indicate significant difference among the four simulated lunar soils ($P < 0.05$).

加生菜的各项生长指标及生物量, 其中 M2 模拟月壤组生菜生物量最大, 这与前文 (2.2 部分) 研究的改变模拟月壤粒径对比对氮磷的保持效果最佳结论一致。说明适当增加模拟月壤中大粒径玄武岩颗粒 (1000~500 μm) 占比不仅可以显著减小氮磷的流失, 从而为生菜的生长提供充足的养分, 使生菜生物量得到显著增加; 而且适当的大粒径颗粒在模拟月壤中可以降低其容重, 增大通气孔隙度, 从而为生菜的根系发育提供良好的生长环境。植物根系对植物生长发育有重要作用, 有研究表明根系生物量越大, 根系活力越强^[38-39], 这与本研究结果一致。但当大粒径颗粒占比过多时 (如 M3 模拟月壤), 则会使其孔隙度进一步扩大, 造成营养的流失, 从而影响生菜的生长发育。

3 结论

随着模拟月壤中大粒径颗粒添加比例的提高, 模拟月壤的容重、持水孔隙度、水气比和电导率均呈递减趋势, 总孔隙度和通气孔隙度呈递增趋势, 保肥效果得到有效改善, 以 M2 模拟月壤得保水保肥效果最好。用于种植生菜, 生菜株高、茎粗、叶宽和叶面积均显著提高, M2 模拟月壤处理的地上部分干重和根干重均显著高于未调节粒径比例的对照月壤, 显示该粒径比例下可最大限度地实现月壤的生产潜力。

参 考 文 献:

- [1] Li C L, Hu H, Yang M F, *et al.* Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. *National Science Review*, 2022, 9(2): 21–33.
- [2] Fu X H, Yin C X, Joliff B L, *et al.* Understanding the mineralogy and geochemistry of Chang'E-5 soil and implications for its geological significances[J]. *Icarus*, 2022, 388: 115254.
- [3] Zong K Q, Wang Z C, Li J W, *et al.* Bulk compositions of the Chang'E-5 lunar soil: Insights into chemical homogeneity, exotic addition, and origin of landing site basalts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 335: 284–296.
- [4] Robens E, Bischoff A, Schreiber A, *et al.* Unger, investigation of surface properties of lunar regolith: Part I[J]. *Applied Surface Sciencem*, 2007, 253(13): 5709–5714.
- [5] Wamelink G W W, Frissel J Y, Krijnen W H J, *et al.* Can plants grow on mars and the moon: A growth experiment on mars and moon soil simulants[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(8): 1–9.
- [6] Yao Z K, Feng J J, Liu H. Bioweathering improvement of lunar soil simulant improves the cultivated wheat's seedling length[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 1–8.
- [7] Setiawan G D, Treesubuntorn C, Krobthong S, *et al.* Using multi-omics approach to investigate the effect of a moon soil simulant on *Vigna radiata* seedling root and shoot growth, stress responses, and photosynthesis[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 202: 550–563.
- [8] Venketeswaran S. Growth of plant tissue cultures in simulated lunar soil: Implications for a lunar base CELSS (Controlled Ecological Life Support System)[J]. *Semiannual Report February 1-July 31, 1988*, 1: 181131.
- [9] Kołodziejczyk A, Vos H C, Harasymczuk M, *et al.* Using lunar regolith for organics: plant growth test using soil analogues[C]. *New Views of the Moon 2-Europe, Lunar Planetary Science Conference Proceedings*, 2017, 6041.
- [10] Paul A L, Elardo S M, Robert F. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration[J]. *Communications Biology*, 2022, 5(1): 1–9.
- [11] Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, *et al.* CAS-1 lunar soil simulant [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(3): 448–454.
- [12] Wamelink G W W, Frissel J Y, Krijnen W H J, *et al.* Crop growth and viability of seeds on Mars and Moon soil simulants[J]. *Open Agriculture*, 2019, 4(1): 509–516.
- [13] Zaets I, Burlak O, Rogutskyy I, *et al.* Bioaugmentation in growing plants for lunar bases[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(6): 1071–1078.
- [14] Gertrud K D, Michelle J B, Jesus A C, *et al.* Endomycorrhizal fungi and opuntia ficus-indica seed germination on a lunar regolith simulant[J]. *Advances in Microbiology*, 2014, 4(10): 616–626.
- [15] Caporale A G, Palladino M, De P S, *et al.* How to make the Lunar and Martian soils suitable for food production-Assessing the changes after manure addition and implications for plant growth[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325(Pt A): 116455.
- [16] 董智令, 展秀丽, 丁小花. 毛乌素沙地西南缘不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 43–48, 56.
- [17] 王少博, 曹亚倩, 冯倩倩, 等. 保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2019, 25(5): 792–804.
- [18] 乔琦, 秦新生, 邢福武, 等. 珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4709–4716.
- [19] 郝丹, 张璐, 孙向阳, 等. 金盏菊栽培中园林废弃物堆肥与牛粪替代泥炭的效果分析[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(8): 1556–1564.
- [20] 黄梓恩, 齐山, 刘克锋, 等. 颗粒粒径配比调控泥炭育苗基质性能及育苗效果[J]. *北京农学院学报*, 2022, 37(4): 19–25.
- [21] 李炎艳, 武占会, 刘明池, 等. 珍珠岩粒径对封闭式无机基质槽培番茄生长的影响[J]. *北方园艺*, 2019, (23): 12–19.
- [22] 马柳. 以煤矸石为基质的生菜种植土壤改良配比研究[D]. 辽宁沈阳: 辽宁大学硕士学位论文, 2021.
- [23] Papike J J, Simon S B, Laul J C. The lunar regolith[J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(4): 761–826.
- [24] Heiken G H, Mckay D S, Brown R W. Lunar deposits of possible pyroclastic origin[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1975, 38(11): 1703.
- [25] Mckay D S, Fruland R M, Heiken G H. Grain size and evolution of lunar soils[C]. *Houston Texas: Lunar Science, Proc Lunar Sci Conf 5th*, 1974, 1.
- [26] Heiken G H, Mckay D S, Fruland R M. Apollo 16 soils: Grain size analyses and petrography[J]. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 1973, 4: 251.
- [27] Karen J, Houck. Petrologic variations in Apollo 16 surface soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 197–209.
- [28] Rhodes J M, Blanchard D P. Apollo 11 breccias and soils - Aluminous mare basalts or multi-component mixtures[J]. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 1982, 12: 607–620.
- [29] Mckay D S, Carter J L, Boles W W, *et al.* JSC-1: A new lunar particles of different land use types in the southwest margin of Maowusu sandy land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 43–48, 56.
- [30] Hao D, Zhang L, Sun X Y, *et al.* Effect analysis of garden waste compost and cow manure replacing peat in *Calendula* cultivation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8): 1556–1564.
- [31] Huang Z E, Qi S, Liu K F, *et al.* Particle size peat substrate properties and the effect of seedling ratio regulation[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2022, 37(4): 19–25.
- [32] Li Y Y, Wu Z H, Liu M C, *et al.* Effect of perlite particle size on tomato growth in closed inorganic substrate[J]. *Northern Horticulture*, 2019, (23): 12–19.
- [33] Ma L. Coal gangue as the ratio of matrix of lettuce planting soil improvement research[D]. *Shenyang, Liaoning: Ms Thesis of Liaoning University*, 2021.

- regolith simulant[A]. Twenty-Fourth Lunar and Planetary Science Conference, Part 2: G-M[C]. Houston, USA: Lunar and Planetary Inst, 1993, 963.
- [30] 王芳芳, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原生物结皮对土壤养分的表层聚集与吸附固持效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1592–1602.
- Wang F F, Xiao B, Li S L, *et al.* Surface accumulation and adsorption of soil nutrients by biological crust in the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(9): 1592–1602.
- [31] 张春泥. 甘蓝型油菜种子低温萌发出苗的差异性研究及耐低温胁迫候选基因的筛选[D]. 湖北武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2021.
- Zhang C N. Study on the difference of seed germination at low temperature and screening of candidate genes for low temperature stress tolerance in *Brassica napus* L. [D]. Wuhan, Hubei: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2021.
- [32] 常士毫. 微塑料与环丙沙星单一和复合污染对生菜生长的影响[D]. 广东佛山: 佛山科学技术学院硕士学位论文, 2020.
- Chang S H. Effects of single and combined contamination of microplastics and ciprofloxacin on lettuce growth[D]. Foshan, Guangdong: MS Thesis of Foshan University, 2020.
- [33] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 287.
- Gao J F. Experimental guidance of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 287.
- [34] 吕贻忠, 李保国. 土壤学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 238.
- Lü Y Z, Li B G. Soil science experiment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 238.
- [35] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 877–881.
- Zhao W Z, Liu Z M, Cheng G D. Fractal characteristics of soil during sandy desertification[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 877–881.
- [36] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析—以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081–3089.
- Wang D, Fu B J, Chen L D, *et al.* Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: A case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3081–3089.
- [37] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 518–525.
- Jia X H, Li X R, Li Y S. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area[J]. Geographical Research, 2007, 26(3): 518–525.
- [38] 李潮海, 周顺利. 土壤容重对玉米苗期生长的影响[J]. 华北农学报, 1994, 9(2): 49–54.
- Li C H, Zhou S L. Effects of soil bulk density on seedling growth of maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1994, 9(2): 49–54.
- [39] 李笃仁, 高绪科, 汪德水. 土壤紧实度对作物根系生长的影响[J]. 土壤通报, 1982, (3): 20–22.
- Li D R, Gao X K, Wang D S. Effects of soil compactness on crop root growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1982, (3): 20–22.