

黄磷渣复合基质栽培番茄配方的优化

杨加仪¹, 范蓉蓉^{2,3}, 李玲珊², 王芳², 冯瑞², 杨艳梅², 陈琪¹, 梁斌¹

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛 266109; 2. 云南云天化股份有限公司, 云南昆明 650228;

3. 云南云天化现代农业发展有限公司, 云南昆明 650600)

摘要:为促进黄磷渣废弃物资源的循环利用和节约椰糠基质成本, 试验以番茄为材料, 通过4因素(粗状磷渣、细状黄磷渣、椰糠、磷石膏)3水平设计L₉(3⁴)正交试验, 探究不同体积配比组成的复合基质对番茄生长情况的影响, 并建立番茄成熟期总生物量(根系+植株+果实)与4因素的多元回归数学模型, 筛选出以黄磷渣为主要复合基质种植番茄的最佳配方。结果表明, 4种因素的各水平对番茄的总生物量(根系+植株+果实)均有一定显著影响, 影响的大小顺序为椰糠>磷石膏>粗状黄磷渣>细状黄磷渣, 方差分析和极差分析显示试验误差小、结果具有可靠性; 多元回归分析结果显示, 最优的基质组合配方是粗状黄磷渣、细状黄磷渣、椰糠和磷石膏的体积占比分别为0.43:0.27:0.14:0.16, 在此条件下, 番茄总生物量预测值可达到每株1420 g。黄磷渣基质取材方便、成本低, 与椰糠和磷石膏以适宜的比例栽培番茄, 可在无土基质栽培中进行推广应用, 同时有效解决黄磷渣生态环境风险高的问题。

关键词:黄磷渣; 番茄; 基质栽培; 复合基质; 生物量

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)03-0078-08

Optimization of Tomato Cultivation Formula with Yellow Phosphorus Residue Composite Substrate

YANG Jiayi¹, FAN Rongrong^{2,3}, LI Lingshan², WANG Fang²,
FENG Rui², YANG Yanmei², CHEN Qi¹, LIANG Bin¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. Yunnan Yuntianhua Co.Ltd., Kunming 650228, China; 3. Yunnan Yuntianhua

Modern Agricultural Development Co.Ltd., Kunming 650600, China)

Abstract: In order to promote the recycling of yellow phosphorus residue waste resources, and save the cost of coconut bran substrate, In this experiment, tomato was used as the test material, through four factor(coarse yellow phosphorus residue, fine yellow phosphorus residue, coconut bran, phosphogypsum) and three level design L₉(3⁴) orthogonal experiment, the effect of composite substrates composed of different volume proportions on tomato growth was explored, and a multiple regression mathematical model of total biomass(root+plant+fruit) and four factors during tomato seedling pulling period was established, and the best formula for planting tomato with yellow phosphorus slag as the main composite substrate was screened out. The results showed that each level of the four factors had a significant impact on the total biomass of tomato(root+plant+fruit), and the order of the impact was coconut bran>phosphogypsum>coarse yellow phosphorus residue>fine yellow phosphorus residue. Variance analysis and range analysis showed that the test error was small and the results were reliable. The results of multiple regression analysis showed that the optimal substrate combination formula was coarse yellow phosphorus residue, fine yellow phosphorus residue, coconut bran, and phosphogypsum, with the volume ratios of 0.43, 0.27, 0.14, and 0.16 respectively. Under this condition, the total biomass of tomato could reach 1420 g per plant. The yellow phosphorus residue substrate is convenient to obtain and low in cost. Cultivation of tomato with the combination of yellow phosphorus residue, coconut bran, and phosphogypsum in a suitable proportion can be popularized and applied in soilless substrate cultivation, and effectively solve the problem of high ecological environment risk of yellow phosphorus residue.

Key words: yellow phosphorus residue; tomatoes; substrate cultivation; composite substrate; biomass

收稿日期: 2023-04-30

基金项目: 云南省重大科技专项计划项目(202102AE090053); 云南(昆明)张福锁高原特色现代农业院士工作站(YSZJGZZ-2022034); 山东省重点研发计划项目(2021CXGC010801)

作者简介: 杨加仪(1997-), 女, 云南保山人, 在读硕士, 研究方向: 设施蔬菜水肥资源高效利用。

通信作者: 梁斌(1983-), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事设施蔬菜水肥资源高效利用工作。

基质栽培是无土栽培种植的主要方式之一,约占无土栽培面积的90%^[1-2],基质的选择影响作物产量与品质^[3-4]。目前椰糠是最为广泛的栽培基质之一,具有保水、保肥能力强,可重复利用等优点,但椰糠基质的孔隙度相对较小,电导率高,易导致根区无机离子(EC)累积的问题,提高了营养液的调控管理难度^[5]。有研究发现,椰糠栽培易降低番茄幼苗叶绿素含量和根系活力,结果期养分会出现吸收不平衡现象,影响番茄果实对Ca元素的吸收,增加脐腐病的患病率,大幅度降低产量^[6-7]。仇淑芳等^[8]研究表明,紫油菜栽培中椰糠与无机基质复合的理化性质较单一椰糠基质可明显提高孔隙度和降低容重等。椰糠与陶粒、蛭石等的复配基质在黄瓜、油菜等蔬菜上的应用研究表明,其对黄瓜、油菜等蔬菜的产量、生长等均有促进作用^[9-11]。王跃华等^[12]研究也表明,在有机基质椰糠中加入适当的无机基质(草炭、蛭石和珍珠岩),可显著提高复合基质的透气性和保水性,更有利于白菜的生长。近年来,随着无土基质栽培的迅速发展,作物栽培基质需求量大幅度增加,所以,就地取材,充分利用各种废弃物、低成本、环保型的栽培基质将成为无土栽培发展的必然趋势^[13]。

目前,我国黄磷渣堆存量惊人,据统计,2020年我国黄磷渣排放堆存总量已超过1亿t^[14]。虽然被应用于制备硅酸盐水泥、混凝土^[15]、陶瓷材料^[16]、微晶玻璃^[17]、烧砖^[18]等建筑材料,但是综合利用率不高、经济效益低,更多的处理方式是路边堆放,对生态环境造成严重污染^[19-20]。云南昆明黄磷渣废弃物资源丰富,基质取材方便,成本低。黄磷渣具有疏松、多孔的结构,成分含有许多植物所需的营养元素,主要有CaO、SiO₂、Fe₂O₃、MgO、P₂O₅等^[21-22],丰富的无机离子使黄磷渣的理化性质偏碱性,可做改良剂应用于酸化土壤中,在农业种植生产过程中具有较高的利用价值^[23]。在设施农业种植上的应用少见报道,做基质需改善其保水效果,栽培喜酸性或者喜中性作物时,需与酸性基质(如磷石膏)进行混合复配使用。有研究表明,在盐碱地上施用适量的磷石膏改良剂能够有效降低其pH值,改善作物根系环境,可促进作物对养分的吸收,达到增产增质的效果^[24-25]。

为最大限度提高黄磷渣资源的有效利用,本研究通过分析比较粗状黄磷渣、细状黄磷渣、椰糠和磷石膏不同体积配比组成的复合基质对番茄生长情况的影响,结合极差分析、方差分析和建立回归

方程分析来筛选出最适合番茄生长并以黄磷渣为主要的复合栽培基质,为促进废弃物资源黄磷渣的循环利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在云南省昆明市宜良县阳宗镇脚步哨村云南云天化现代农业梁王山有限公司基地一号温室大棚进行,海拔高2 321 m,年平均温度在20.6℃,年均降水量在670 mm。

1.2 试验材料

番茄选用的品种为戴安娜,来自山东寿光春博农业科技有限公司育苗场。供试的栽培基质有粗状黄磷渣(A)、细状黄磷渣(B)、椰糠(C)和磷石膏(D),黄磷渣和磷石膏来自于云南磷化集团有限公司,椰糠来自于山东省寿光市绿田国际商贸有限公司。

1.3 试验设计

在温室大棚内,2022年9月22日使用内黑外白的无土基质栽培袋(18 cm×18 cm×20 cm)定植番茄,幼苗两叶一心。无土基质的配制以粗状黄磷渣(A)、细状黄磷渣(B)、椰糠(C)和磷石膏(D)为4个因素,每个因素设置3个水平,利用SPSS软件设计L₉(3⁴)正交试验(表1),不同体积比例混合基质的基础理化性质见表2。

一个栽培袋种植一棵番茄,株距为0.4 m,每个处理3次重复,随机区组设计,每个重复种植6棵番茄,于第3穗果开始对其进行打顶,每穗留果4~6个,每个栽培袋底下都设有一个收集多余营养滤液的回液桶。

根据番茄不同时期对水肥需求不同,将番茄整个生育期分为苗期、开花结果期和成熟期3个阶段,其每个阶段对应的NO₄-N、NH₄⁺-N、P、K元素养分浓度分别为5、2、2、4 mmol/L,9、3、2、5 mmol/L和12、3、2、6 mmol/L。苗期每棵番茄每次给予50 mL的营养液,开花结果期每次给予250 mL营养液,成熟期每次给予300 mL营养液,浇水频率根据天气情况确定,所有处理的营养液浓度和灌溉量均设定相同,当回液桶的营养滤液超过桶的2/3时,对其进行回收利用用于对应的番茄植株,每次给予番茄灌溉时都会记录,最后将统计数进行累加,即为试验各个处理的灌水施肥量。试验于2023年1月10日拉秧,试验期共计111 d。

表 1 正交试验设计
Tab.1 Orthogonal test design table

| 组号 | 处理 Treatment | 粗状黄磷渣(A) Coarse yellow phosphorus residue | 细状黄磷渣(B) Fine yellow phosphorus residue | 椰糠(C) Coconut bran | 磷石膏(D) Phosphogypsum |
|----|-----------------|---|---|-----------------------|-------------------------|
| T1 | A1B3C3D1 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0 |
| T2 | A1B3C2D2 | 0.3 | 0.5 | 0.1 | 0.1 |
| T3 | A1B2C2D3 | 0.3 | 0.4 | 0.1 | 0.2 |
| T4 | A2B2C3D3 | 0.4 | 0.4 | 0.2 | 0.2 |
| T5 | A2B1C3D2 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
| T6 | A2B2C1D3 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0.2 |
| T7 | A3B3C1D1 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| T8 | A3B1C1D2 | 0.5 | 0.3 | 0 | 0.1 |
| T9 | A3B1C2D1 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 0 |

表 2 不同比例复合基质的基础理化性质
Tab.2 Basic physical and chemical properties of composite substrates with different proportions

| 处理 Treatment | 容重/(g/cm ³) Bulk density | 孔隙度/% Porosity | 田间持水量/% Field water hold- ing capacity | pH | 处理 Treatment | 容重/(g/cm ³) Bulk density | 孔隙度/% Porosity | 田间持水量/% Field water hold- ing capacity | pH |
|-----------------|---|-------------------|--|------|-----------------|---|-------------------|--|------|
| T1 | 1.46 | 45.98 | 15.43 | 7.41 | T6 | 1.33 | 50.26 | 18.07 | 7.54 |
| T2 | 1.54 | 45.24 | 15.79 | 8.53 | T7 | 1.32 | 59.03 | 20.34 | 8.79 |
| T3 | 1.59 | 43.01 | 12.98 | 8.72 | T8 | 1.58 | 45.11 | 18.98 | 7.45 |
| T4 | 1.71 | 40.31 | 14.61 | 7.53 | T9 | 1.63 | 41.95 | 13.61 | 8.26 |
| T5 | 1.56 | 44.73 | 17.14 | 7.81 | | | | | |

1.4 测定项目及方法

在苗期、开花结果期和拉秧期分别采集 9 株具有代表性番茄植株,测定株高、茎粗、生物量、总根长等生长指标后将植物样品置于烘箱,105℃杀青 30 min,75℃烘干至恒质量,烘干样用来测定全氮、全磷、全钾含量。烘干样经粉碎、H₂SO₄-H₂O₂消煮后,全氮采用凯氏定氮仪测定,全磷采用钒钼酸铵比色法测定,全钾采用火焰光度计测定。番茄定植后第 51 天进入采收期,每处理随机选取 3 株番茄植株,测定选定植株的单果质量、果实数量,最后计算单棵产量。拉秧后计算汇总各处理的水肥投入总量,计算养分利用吸收情况。

最终主要以拉秧时番茄植株鲜质量、果实鲜质量和根系鲜质量的总生物量来判断植株的生长状况,并考虑各处理基质组成成分间的交互作用,对试验结果进行正交回归分析,采用回归分析方程如下。

$$Y = C + \sum_{n=1}^4 X_n + \sum_{n=1}^4 X_n^2 \quad (1)$$

式中,C 为常数项,X_n代表自变量(即粗状黄磷渣、细状黄磷渣、椰糠、磷石膏 4 种基质)。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 25、Origin 8.5 和 Minitab 21 软件对数据进行统计、分析和图表制作。

2 结果与分析

2.1 复合基质对番茄生长的影响

从表 3 可以看出,发现粗状黄磷渣(A)、细状黄磷渣(B)、椰糠(C)、磷石膏(D)4 种基质的不同体积比混合显著影响着番茄植株的生长。在苗期,T4 和 T6 处理的植株鲜质量、株高、根系鲜质量、总根长、根表面积和根体积较其他处理分别显著提高 28.4%~118.5%、30.3%~121.9%;20.3%~51.9%、7.1%~34.9%; 14.5%~61.4%、17.8%~65.9%; 16.6%~171.4%、6.3%~147.6%;34.6%~125.4%、11.8%~87.1%; 32.3%~95.7%、12.7%~65.2%。在开花结果期,T6 处理的植株鲜质量、株高、总根长、根表面积和根体积均表现最好,较其他处理分别显著提高 19.7%~135.1%、2.8%~25.5%、43.5%~162.1%、26.6%~128.5%、32.5%~246.4%。T4 处理的根系鲜质量较其他处理分别显著增加

12.3%~75.2%。

表3 复合基质对番茄生长的影响
Tab.3 Effect of compound substrate on tomato growth

| 时期 Stage | 处理 Treatment | 植株鲜质量/(g/株) Plant fresh weight | 株高/cm Plant height | 根系鲜质量/(g/株) Root fresh weight | 总根长/m Total root length | 根表面积/cm ² Root surface area | 根体积/cm ³ Root volume |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------|---|------------------------------------|
| 苗期 Seedling stage | T1 | 15.5±1.1f | 38.2±2.1de | 4.8±0.2cd | 19.7±0.8bc | 256.1±23.8de | 2.8±0.4bc |
| | T2 | 18.4±2.2de | 43.3±1.5bc | 5.1±0.2c | 18.9±0.3c | 253.4±7.8de | 2.8±0.2bc |
| | T3 | 20.2±1.2d | 38.0±3.1de | 6.0±0.1b | 19.1±12.4c | 283.4±12.7cd | 3.4±0.7bc |
| | T4 | 33.9±0.8a | 52.1±1.1a | 7.1±0.3a | 33.7±3.4a | 448.7±5.6a | 4.5±0.1a |
| | T5 | 23.5±1.3c | 41.7±2.1cd | 6.2±0.3b | 27.8±2.7b | 333.3±13.7bcd | 3.1±0.2bc |
| | T6 | 34.4±0.7a | 46.3±0.6a | 7.3±0.5a | 30.7±4.1a | 372.4±25.7a | 3.9±0.3a |
| | T7 | 26.4±1.1b | 41.3±3.5cd | 5.3±0.1c | 28.9±2.8a | 332.3±24.3bcd | 3.0±0.2bc |
| | T8 | 15.7±0.4ef | 34.3±1.5e | 4.4±0.3d | 12.4±12.1c | 199.1±16.5e | 2.3±0.3c |
| | T9 | 23.3±2.5c | 41.0±1.1cd | 6.2±0.2b | 26.2±15.5ab | 288.3±15.2cd | 3.3±0.3bc |
| 开花结果期 Blooming and fruiting stage | T1 | 501.7±30.3cd | 101.0±4.0bcd | 34.5±3.1g | 247.2±9.8bc | 3273.5±162.7cd | 35.4±1.0b |
| | T2 | 656.1±20.5b | 101.2±2.5cd | 89.4±5.1d | 220.6±71.3c | 3810.1±86.9bcd | 37.1±1.7b |
| | T3 | 198.1±40.6f | 103.3±2.5bc | 52.1±5.9f | 376.7±30.6d | 1297.5±431.1f | 18.3±8.9c |
| | T4 | 442.6±68.9cde | 105.3±1.5bc | 156.6±10.7a | 364.4±58.7bc | 4614.6±984.2b | 46.8±17.0b |
| | T5 | 459.2±37.6cde | 105.0±1.0bc | 96.3±6.3cd | 292.2±24.1bc | 3878.8±352.7bcd | 41.1±4.4b |
| | T6 | 785.5±14.7a | 108.3±1.5a | 104.6±4.3c | 578.9±78.7a | 7222.2±972.3a | 63.4±5.2a |
| | T7 | 560.5±54.6bc | 86.3±1.1f | 65.7±3.0e | 288.9±52.3bc | 3602.1±555.5bcd | 37.2±4.5b |
| | T8 | 334.9±39.2e | 97.0±2.0d | 70.3±5.1e | 231.1±16.7b | 3160.3±432.2d | 35.3±10.0b |
| | T9 | 422.4±15.6de | 102.3±3.0bc | 130.9±5.2b | 403.3±38.9bc | 5704.2±721.5bc | 61.4±17.8b |

注:每列不同小写字母表示在P<0.05水平上差异显著。表4、5同。

Note: Different lowercase letters in each column indicated significant differences(P<0.05). The same as Tab.4, 5.

2.2 复合基质对番茄全生育期养分携出量、产量、养分利用率的影响

4种基质不同体积比混合显著影响着番茄的养分吸收、利用和产量,结果如表4、5所示。

表4 复合基质对番茄全生育期养分携出量和果实产量的影响

Tab.4 Effects of compound substrate on nutrient carrying-out and fruit yield of tomato in the whole growth period

| 处理 Treatment | 养分携出量/(g/株) Nutrient carrying-out | | | 产量/ (kg/株) Yield |
|-----------------|--------------------------------------|-------------|--------------|------------------------|
| | N | P | K | |
| T1 | 66.4±15.8cd | 21.8±9.4df | 79.56±18.6bc | 40.9±1.8ef |
| T2 | 97.9±20.4b | 24.7±6.4cd | 100.6±30.6b | 51.9±5.7bc |
| T3 | 99.6±1.7b | 27.8±0.3bc | 93.9±4.1b | 52.5±4.1b |
| T4 | 98.6±8.1b | 25.3±2.3cd | 96.3±7.6b | 48.36±5.3cd |
| T5 | 70.1±7.1c | 20.1±3.6df | 85.1±9.0bc | 44.6±3.1de |
| T6 | 95.3±12.6b | 22.3±2.5cdf | 99.7±29.9b | 53.8±5.8b |
| T7 | 56.7±9.3d | 18.9±2.9f | 65.4±22.1c | 39.9±3.1f |
| T8 | 128.2±1.4a | 37.6±6.8a | 134.9±13.3a | 57.1±3.9a |
| T9 | 106.7±1.2b | 32.3±3.7ab | 96.9±10.8b | 46.4±5.1d |

由表4、5可知,在成熟期,T8处理的总养分吸收量(N+P+K)较其他处理(T1、T2、T3、T4、T5、

T6、T7、T9)分别显著提高79.2%、35.2%、36.8%、37.9%、73.8%、40.7%、117.5%、30.8%(P<0.05);总养分利用率较其他处理(T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T9)分别显著提高了109.2%、70.0%、59.4%、63.6%、101.4%、63.0%、148.3%、46.4%(P<0.05)。T8处理最有利于提高番茄的产量,较单一黄磷渣基质(T7处理)显著提高43.1%(P<0.05)。

表5 复合基质栽培对番茄全生育期养分利用率的影响
Tab.5 Effect of compound substrate cultivation on nutrient utilization rate of tomato in the whole growth period

| 处理 Treatment | 养分利用率/% Nutrient utilization rate | | |
|-----------------|--------------------------------------|---------------|--------------|
| | N | P | K |
| T1 | 39.64±5.66cd | 43.76±11.39df | 43.75±6.14bc |
| T2 | 57.20±4.52b | 44.75±3.01cdf | 54.77±9.88b |
| T3 | 59.40±0.61b | 55.84±0.38bc | 51.61±1.33b |
| T4 | 58.85±2.90b | 50.82±2.80cd | 52.92±2.50b |
| T5 | 45.40±2.52c | 39.89±4.29df | 46.79±2.97bc |
| T6 | 58.36±7.29b | 49.49±7.69cd | 55.32±10.09b |
| T7 | 33.82±3.33d | 37.09±3.56f | 36.24±7.28c |
| T8 | 76.48±0.51a | 75.41±8.12a | 74.12±4.38a |
| T9 | 63.65±0.43b | 64.78±4.41ab | 53.24±3.56b |

2.3 生物量对基质组成的响应

番茄的高产与根系生长情况、植株长势强弱等密切相关,番茄的整体生物量(根系+植株+果实)可直观地表现出番茄产量的高低,所以,对正交试验总生物量生长指标结果进行极差(R)分析(表6),以R值的大小来衡量正交试验中粗状黄磷渣、细状黄磷渣、椰糠和磷石膏等4个因素作用的大小,通常R值越大的因素越重要,说明该因素的3个水平对总生物量指标所造成的差别大,从表6的极差分析结果可以看出,对番茄整体生物量影响最大的因素从大到小排序为椰糠(C)>磷石膏(D)>

粗状黄磷渣(A)>细状黄磷渣(B)。还可以通过极差分析的数据,绘制出各因素水平与番茄总生物量的主效应关系曲线图,再根据曲线的波动来判断各因素的影响趋势(图1),从主效应关系来看,番茄总生物量(根系+植株+果实)随粗状黄磷渣(A)用量的增加呈先快速上升后下降的趋势;随细状黄磷渣(B)用量的增加呈一直下降的趋势;随椰糠(C)用量增加呈先快速上升再缓慢上升的趋势;随磷石膏(D)的用量增加呈一直增长的趋势。

表6 不同比例复合基质栽培对番茄总生物量的极差分析

Tab.6 Range analysis of tomato total biomass under different proportions of compound substrate cultivation

| 处理 Treatment | A | B | C | D | 总生物量/(g/株) Total biomass |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|-----------------------------|
| T1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 505.32 |
| T2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 881.66 |
| T3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 954.05 |
| T4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1349.19 |
| T5 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1064.62 |
| T6 | 2 | 2 | 3 | 1 | 564.32 |
| T7 | 3 | 1 | 1 | 1 | 781.98 |
| T8 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1034.89 |
| T9 | 3 | 2 | 2 | 2 | 811.21 |
| k1 | 780.3 | 963.1 | 617.2 | 793.7 | |
| k2 | 992.7 | 909.4 | 1014.0 | 827.0 | |
| k3 | 876.0 | 776.5 | 1017.9 | 1028.4 | |
| R | 212.4 | 186.6 | 400.6 | 234.7 | |

因素主次分析
Analysis of primary and secondary factors

C>D>A>B

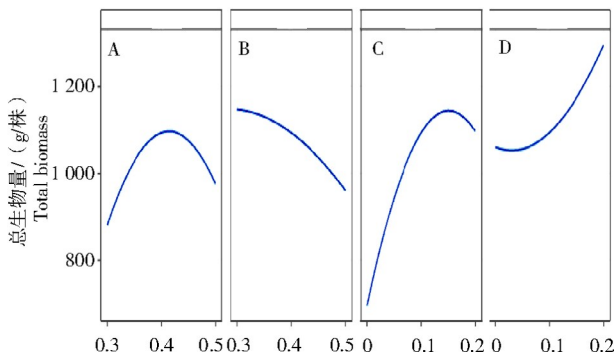


图1 4种基质因素的主效应关系曲线
Fig.1 Main effect relationship curve of four substrate factors

采用SPSS软件对番茄总生物量指标进行方差分析(表7)。根据F值可知,粗状黄磷渣(A)、细状黄磷渣(B)、椰糠(C)、磷石膏(D)的用量对番茄

的总生物量均有一定的显著差异影响,根据P值可知,4个因素所选择的各水平之间对试验结果的总生物量均具有显著影响。

表7 不同比例复合基质栽培对番茄总生物量的方差分析
Tab.7 Analysis of variance of tomato total biomass under different proportions of composite substrate cultivation

| 影响因素 Influence factor | 自由度 Degree of freedom | 均方 Man square | F值 F value | 显著性 Significance |
|--------------------------|--------------------------|------------------|---------------|---------------------|
| A | 2 | 67 868 | 4.3 | * |
| B | 2 | 55 369 | 3.5 | * |
| C | 2 | 318 000 | 4.7 | * |
| D | 2 | 96 765 | 6.6 | * |
| 误差 Error | 0 | 3.780 | | |
| 合计 Total | 8 | 538 005.780 | | |

采用 Minitab 软件对表 6 中的数据建立可反映出 4 种基质因素(自变量)与番茄总生物量(因变量)之间关系的多元回归方程。

$$Y = -1029 + 4544X_1 + 150X_2 + 3955X_3 - 339.1X_4 - 2902X_1^2 - 348.2X_2^2 - 8733X_3^2 + 3788X_4^2 \quad (1)$$

其中, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表粗状黄磷渣(A)、细状黄磷渣(B)、椰糠(C)和磷石膏(D)

再进一步利用 Minitab 软件的响应优化功能对建立的多元回归方程求解, 响应结果显示, 当 Y(番茄总生物量) 值达到最大(1 420.22 g) 时, 此时, 粗状黄磷渣(A)、细状黄磷渣(B)、椰糠(C)和磷石膏(D) 基质混合的体积占比分别为 0.43、0.27、0.14、0.16, 且均在 95% 的置信区间内。

3 讨论

3.1 不同比例复合基质对番茄生长的影响

复合基质中不同基质组成或成分相同基质的不同占比组成对农作物的生长情况表现也会有不同, 合理的基质配比能够促进设施无土栽培番茄的生长^[26]。刘升学等^[27]研究不同无机基质混合对番茄生长的影响, 结果表明, 珍珠岩和蛭石混合比为 2:1, 可促进番茄茎粗和根系的生长。张明伟^[28]研究表明, 椰糠和草炭的混合比为 1:2, 可提高紫油菜的植株和根系生长。张力方等^[29]研究不同基质混合对茼蒿生长的影响, 结果表明, 不同基质混合栽培茼蒿对其生物量的积累存在显著差异。本研究表明, 在苗期和开花结果期 T4 和 T6 处理的植株鲜质量、株高、根系鲜质量、总根长均显著高于其他处理, 有很大可能是因为 T4 和 T6 处理的基质体积占比混合适宜, 基础理化性质较优, 为番茄根系提供了良好的生长环境, 并促进了番茄地上部的生长, 从而有利于生物量的积累。宋晓晓等^[30]研究发现, 在无机基质中添加有机基质来栽培生菜, 会提高生菜的生物量。时政宇等^[31]研究表明, 含有 74% 的椰糠混合基质比含有 95% 的椰糠更适合栽培茼蒿, 可以使茼蒿的生物量提高, 说明适量的椰糠可显著提高农作物的生物量, 这与本试验研究结果相一致, 添加椰糠的复合基质的生物累积情况均高于未添加椰糠的。

3.2 不同比例复合基质对养分吸收、利用和果实产量的影响

不同复合基质栽培的番茄在养分吸收、利用情况及产量高低方面多少存在一定的差异, 这与复合基质的理化性质有密切的关系, 影响番茄根系对营

养液中养分的吸收, 致使生长表现不同。刘振国^[32]研究发现, 在蛭石中加入玉米秸秆能够促进黄瓜根系对养分的吸收, 有利于黄瓜的生长发育, 提高黄瓜的产量。王虹等^[33]研究发现, 当椰糠、草炭和珍珠岩的体积比为 1:1:1, 可显著提高生菜的产量。杜慧芳等^[34]研究表明, 有机基质与无机基质混合栽培大蒜在养分吸收、利用和产量上显著高于土壤栽培。聂书明等^[35]研究表明, 菇渣、麦秆和河沙的复配体积比为 4:4:2 时, 栽培番茄可提高养分的利用效率, 获得较高的产量。刘佳^[36]研究表明, 在椰糠中加入部分珍珠岩, 能显著提高番茄对养分的吸收和利用, 从而达到增产的效果。张衍栋等^[37]研究表明, 在设施无土栽培番茄中施用磷石膏可促进番茄对 Ca、P、Si 及其他微量元素的吸收和利用, 在产量方面也得到了显著提高。本研究表明, 在黄磷渣基质的基础上, 添加适量的椰糠基质和磷石膏基质可以很好地促进番茄植株和根系的生长、影响养分的吸收利用和显著提高了番茄的产量, 在肥料投入相同的条件下, T8 处理的总养分(N+P+K) 吸收量较其他处理(T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T9) 分别显著提高 79.2%、35.2%、36.8%、37.9%、73.8%、40.7%、117.5%、30.8%; 总养分(N+P+K) 利用率较其他处理(T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T9) 分别显著提高了 109.2%、70.0%、59.4%、63.6%、101.4%、63.0%、148.3%、46.4%。这可能是因为 T8 处理的容重、孔隙度、田间持水量和 pH 等理化性质优于其他复合基质, 有利于番茄根系对养分元素的吸收利用, 促进地上部果实的发育, 达到增产的效果。T8 处理最利于提高番茄的产量, 较单一黄磷渣组成基质(T7 处理) 显著提高 43.1%。

3.3 生物量对不同比例复合基质组成的响应

番茄的高产与根系生长情况、植株长势强弱等密切相关, 番茄的整体生物量(根系+植株+果实) 可直观地评价番茄产量的高低。本正交试验各处理表现出番茄的整体生物量具有显著差异, 其原因可能是复合基质中单一基质间组成的成分过多或者过少对其理化性质造成较大的差异, 为了更好的揭示 4 种基质因素之间的交互作用, 进一步对正交试验番茄总生物量的结果建立了回归方程分析, 发现了虽然 T4 的整体生物量为最高, 但并非是最佳的复合基质, 当粗状黄磷渣、细状黄磷渣、椰糠和磷石膏体积占比分别为 0.43:0.27:0.14:0.16 时, 番茄总生物量可达到 1 420.22 g/株。

4 结论

目前,我国黄磷渣堆存量惊人,造成严重的生态压力。在大力倡导农业经济循环、节约资源、降低生产成本的形势下,云南昆明黄磷渣废弃物资源丰富,基质取材方便,成本低,可作为一种环保可再生栽培基质种植番茄,在其基础上添加适量的椰糠基质和磷石膏基质可以很好地改善单一黄磷渣基质的保水效果以及偏碱性带来的问题,可促进番茄植株和根系的生长、提高对养分元素的吸收利用、进而达到增产的目的。所以,粗状黄磷渣:细状黄磷渣:椰糠:磷石膏=0.43:0.27:0.14:0.16 时混合栽培番茄,番茄总生物量最高,该技术可以在昆明市及其周围地区进行推广。

参考文献:

- [1] BAHMANBIGLO FARZAD AMIRI, ESHGHI SAEID. Improving the growth, yield and iron concentration of strawberry using sodium hydrosulfide (NaHS) under soilless culture[J]. Journal of Plant Nutrition, 2024, 47(5):786-796.
- [2] 焦雪辉,史喜兵,申潇潇.不同基质配比对6种青冈属植物生长的影响[J].山西农业科学,2022,50(4):532-539.
JIAO X H, SHI X B, SHEN X X, et al. Effects of different substrate ratios on the growth of six species of Cyclobalanopsis[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(4):532-539.
- [3] 孙杰,卫旭阳.高架栽培对草莓生长和果实品质的影响[J].山西农业科学,2021,49(11):1312-1316.
SUN J, WEI X Y. Effects of elevated culture on growth and fruit quality of strawberry[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(11):1312-1316.
- [4] 郭世荣.无土栽培学[M].北京:中国农业出版社,2003.
GUO S R. Soilless culture[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2003.
- [5] 刘佳,季延海,王宝驹,等.椰糠复合基质对温室番茄生长及品质的影响[J].江苏农业科学,2019,47(17):150-154.
LIU J, JI Y H, WANG B J, et al. Effects of coconut bran composite substrate on growth and quality of tomato in greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(17):150-154.
- [6] 孙建磊,吕晓惠,赵西,等.椰糠与蛭石不同对比对番茄穴盘苗生长的影响[J].中国蔬菜,2016(5):45-48.
SUN J L, LYU X H, ZHAO X, et al. Effect of different coconut coir and vermiculite substrate ratio on growth indexes of tomato plug seedlings[J]. China Vegetables, 2016(5):45-48.
- [7] 熊静.不同调控措施对基质根区养分累积及番茄生长的影响[D].北京:中国农业大学,2017.
XIONG J. Effects of different control measures on nutrient accumulation in substrate root-zone solution and tomato growth[D]. Beijing:China Agricultural University, 2017.
- [8] 仇淑芳,杨乐琦,黄丹枫,等.草炭椰糠复合基质对‘紫油菜’生长和品质的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2016,34(2):40-46.
QIU S F, YANG L Q, HUANG D F, et al. Effects of com-
- ound substrates with peat and coco peat on the growth characters and the quality of *Brassica campestris* l. ssp. *chinensis* (L.) 'ziyoucai'[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2016, 34(2):40-46.
- [9] 朱国鹏,刘士哲,陈业渊,等.基于椰糠的新型无土栽培基质研究(II):配方试种筛选[J].热带作物学报,2005,26(2):100-106.
ZHU G P, LIU S Z, CHEN Y Y, et al. Study on new coir-based medium for soilless culture II. formula selection and evaluation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2005, 26(2):100-106.
- [10] 华炜辉.椰糠栽培甜椒技术的优化与推广应用[D].福州:福建农林大学,2014.
HUA W H. Optimization and popularization of sweet pepper cultivation technology with coconut bran[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [11] 狄文伟,赵瑞,张婷,等.基于椰糠的基质配比对袋培黄瓜生长的影响[J].湖北农业科学,2008,47(4):440-442.
DI W W, ZHAO R, ZHANG T, et al. The influence of different proportion of coir pith in medium on growth of cucumber planted in bags[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2008, 47(4):440-442.
- [12] 王跃华,张明科,惠麦侠,等.不同椰糠配比基质对白菜幼苗生长的影响[J].南方农业学报,2019,50(12):2749-2754.
WANG Y H, ZHANG M K, HUI M X, et al. Effects of coconut peat substrate with different proportions on seedling growth of Chinese cabbage[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(12):2749-2754.
- [13] 刘伟,于红军,姜伟杰.中国蔬菜生产培养基研究进展及应用综述[J].中国生态农业学报,2006(3):4-7.
LIU W, YU H J, JIANG W J. Research progress and application review of vegetable production culture media in China[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2006(3):4-7.
- [14] 刘志强,郝梓国,刘恋,等.我国尾矿综合利用研究现状及建议[J].地质论评,2016,62(5):1277-1282.
LIU Z Q, HAO Z G, LIU L, et al. Status of the comprehensive utilization of tailings in China and suggestions[J]. Geological Review, 2016, 62(5):1277-1282.
- [15] QIAN G P, WANG K, BAI X P, et al. Effects of surface modified phosphate slag powder on performance of asphalt and asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158:1081-1089.
- [16] 杨恩林,张杰.黄磷渣制备多孔陶瓷的研究[J].中国陶瓷,2008,44(5):35-37.
YANG E L, ZHANG J. Research on porous ceramics with yellow phosphorus preparation[J]. China Ceramics, 2008, 44(5):35-37.
- [17] LIU H P, MA L P, HUANG X F, et al. Phase transformation of glass-ceramics produced by naturally cooled yellow phosphorus slag during calcination[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 712:510-516.
- [18] 孙成,郑峰伟,任园园,等.黄磷渣资源化利用研究[J].现代化工,2017,37(8):28-31.
SUN C, ZHENG F W, REN Y Y, et al. Research on utilization of yellow phosphorus slag[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(8):28-31.
- [19] 李甫,沈毅.贵州省黄磷渣资源化利用研究[J].中国非金属矿

- 工业导刊,2007(4):18-20.
- LI F, SHEN Y. Research on resourceful application of yellow phosphorus slag in Guizhou province[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, 2007(4):18-20.
- [20] 杨家宽,肖波,王秀萍. 黄磷渣资源化进展与前景[J]. 矿产综合利用,2002(5):37-41.
- YANG J K, XIAO B, WANG X P. Progress and prospects for comprehensive utilization of yellow phosphorus slag[J]. Multi-purpose Utilization of Mineral Resources, 2002(5):37-41.
- [21] SHI C J, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(3):1656-1663.
- [22] ZHANG Z Q, WANG Q, YANG J. Hydration mechanisms of composite binders containing phosphorus slag at different temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147:720-732.
- [23] 高旭伟,吴勇生. 黄磷渣资源化利用的现状与发展趋势[J]. 中国资源综合利用,2010,28(1):28-30.
- GAO X W, WU Y S. The current comprehensive utilization and developing tendency of phosphorus slag[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2010, 28(1):28-30.
- [24] 邵玉翠,张余良,李悦,等. 天然矿物改良剂在微咸水灌溉土壤中应用效果的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):100-103.
- SHAO Y C, ZHANG Y L, LI Y, et al. Study of effect on using natural minerals to improve soil in irrigating brackish water[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(4):100-103.
- [25] 官娅莉,陈静曦,李洪飞. 磷石膏对盐碱土的改良研究[J]. 内蒙古环境科学,2008,20(1):57-59.
- GUAN Y L, CHEN J X, LI H F. The study on saline and alkaline soil amelioration with phosphorus gypsum[J]. Inner Mongolian Environmental Sciences, 2008, 20(1):57-59.
- [26] 崔秀敏,王秀峰,孙春华,等. 番茄育苗基质特性及其育苗效果[J]. 上海农业学报,2001(3):68-71.
- CUI X M, WANG X F, SUN C H, et al. Characteristics of tomato seedling substrate and its seedling effect[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2001(3):68-71.
- [27] 刘升学,于贤昌,刘伟,等. 有机基质配方对袋培番茄生长及产量的影响[J]. 西北农业学报,2009,18(3):184-188.
- LIU S X, YU X C, LIU W, et al. Effects of organic substrate compositions on growth and yield of tomato cultivated in bag[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(3):184-188.
- [28] 张明伟. 新型椰糠基质与泥炭基质栽培小白菜效果研究[J]. 现代农业科技,2019(1):73,75.
- ZHANG M W. Study on the effect of cultivating Chinese cabbage with new coconut bran substrate and peat substrate[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(1):73,75.
- [29] 张力方,李志元,刘宇翔,等. 不同复合基质对盆栽茼蒿生长状况的综合评价[J]. 中国农业科技导报,2023,25(5):1-11.
- ZHANG L F, LI Z Y, LIU Y X, et al. Comprehensive evaluation of different composite substrates on the growth of potted coriander[J]. China Agricultural Science and Technology Herald, 2023, 25(5):1-11.
- [30] 宋晓晓,邹志荣,曹凯,等. 不同有机基质对生菜产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(6):153-160.
- SONG X X, ZOU Z R, CAO K, et al. Effects of different organic substrates on the yield and quality of lettuce[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2013, 41(6):153-160.
- [31] 时振宇,陈健,贾凯,等. 不同配比基质对黄瓜、番茄幼苗生长及品质的影响[J]. 天津农业科学,2020,26(1):76-81,90.
- SHI Z Y, CHEN J, JIA K, et al. Effects of different proportioning substrates on the growth and quality of cucumber and tomato seedlings[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, 26(1):76-81,90.
- [32] 刘振国. 玉米秸秆不同配比基质对黄瓜生长发育的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2009.
- LIU Z G. Effects of the different corn straw substrates on cucumber growth and development[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.
- [33] 王虹,金海军. 不同复合基质对生菜产量及品质的影响[J]. 上海蔬菜,2022(5):40-42.
- WANG H, JIN H J. Effects of different composite substrates on yield and quality of lettuce[J]. Shanghai Vegetables, 2022(5):40-42.
- [34] 杜慧芳,程志辉,薛晓娜,等. 有机与混合配方对大蒜苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(10):91-95.
- DU H F, CHEN Z H, XUE X N, et al. Effects of organic and mixed formulas on the growth of garlic seedlings[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2006, 34(10):91-95.
- [35] 聂书明,杜中平. 不同基质配方对番茄果实品质及产量的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(16):149-152.
- NIE S M, DU Z P. Effects of different substrate formulas on fruit quality and yield of tomato[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(16):149-152.
- [36] 刘佳. 番茄椰糠复合基质栽培关键技术研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
- LIU J. Study on key techniques for tomato cultivation using coconut bran compound substrate[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [37] 张衍栋,张丽英. 磷石膏在日光温室番茄生产中的应用试验[J]. 农村实用工程技术(温室园艺),2004,24(9):40.
- ZHANG Y D, ZHANG L Y. Application experiment of phosphogypsum in tomato production in solar greenhouse[J]. Agricultural Engineering Technology, 2004, 24(9):40.