

郑洁文,刘馨月,曹涛涛,等.不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗生长生理的影响[J].山西农业科学,2025,53(3):58-67.
ZHENG J W, LIU X Y, CAO T T, et al. Effects of different proportions of fly ash in seedling substrates on the growth and physiology of tomato seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(3): 58-67.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.03.07

不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗生长生理的影响

郑洁文,刘馨月,曹涛涛,张凯煜,李强,亢福仁

(榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室,陕西 榆林 719000)

摘要:为探讨粉煤灰不同配比的育苗基质作为育苗的可行性和适宜配比,选取番茄为试验材料,设置7个处理,以商品基质为对照(CK),将10%和30%粉煤灰混合料分别与蛭石按不同体积比(1:1、1:2、1:4)混合,分别记为M11、M12、M14、H11、H12、H14,研究复合基质的容重、孔隙度、气水比、pH、电导率、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾等理化性质以及番茄幼苗的株高、茎粗、生物量、根冠比、壮苗指数、SOD活性、POD活性、CAT活性、MDA和叶绿素含量等指标。结果表明,粉煤灰育苗基质能显著提高番茄幼苗的株高、茎粗、生物量、根冠比、叶绿素含量,对番茄幼苗生长具有一定的促进作用。其中,与对照相比,H12(30%粉煤灰基质:蛭石=1:2)处理番茄的株高、茎粗、叶绿素含量分别显著增加22.3%、23.6%和8.7%;POD活性和SOD活性均明显高于其他处理。通过主成分分析和综合评价发现,H12处理的得分最高,即育苗基质为30%粉煤灰堆肥基质:蛭石=1:2配比时,番茄幼苗的整体长势较好。

关键词:育苗基质;粉煤灰;番茄幼苗;理化性质

中图分类号:S641.2

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2025)03-0058-10

Effects of Different Proportions of Fly Ash in Seedling Substrates on the Growth and Physiology of Tomato Seedlings

ZHENG Jiewen, LIU Xinyue, CAO Taotao, ZHANG Kaiyu, LI Qiang, KANG Furen

(Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Northern Shaanxi

Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China)

Abstract: In order to explore the feasibility and optimal proportions of seedling substrates with different ratios of fly ash, in this study, tomatoes were selected as the test material. Seven treatments were set up, with a commercial substrate as the control group(CK), and 10% and 30% of fly ash mixtures were mixed with vermiculite at ratios of 1:1, 1:2, and 1:4, respectively, designated as M11, M12, M14, H11, H12, and H14. The physicochemical properties of the composite substrates, including bulk density, porosity, air-water ratio, pH, conductivity, organic matter, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium, were examined. Additionally, the growth and physiological indices of tomato seedlings, such as plant height, stem thickness, biomass, root-crown ratio, seedling index, SOD activity, POD activity, CAT activity, MDA content, and chlorophyll content, were investigated. The results showed that fly ash seedling substrate could significantly increase the plant height, stem thickness, biomass, root-crown ratio, and chlorophyll content of tomato seedlings, promoting their growth. Specifically, compared with the control group, the H12 treatment(30% of fly ash: vermiculite=1:2) showed significant increases in plant height, stem thickness, and chlorophyll content by 22.3%, 23.6%, and 8.7%, respectively, and both POD and SOD activities were significantly higher than those of other treatments. The H12 treatment was found to have the highest score through principal component analysis and comprehensive evaluation. The appropriate fly ash ratio could improve the growth physiology of tomato seedlings and the overall growth of tomato seedlings was better when the substrate

收稿日期:2024-06-05

基金项目:国家自然科学基金(32360316);陕西省科技厅创新能力支撑计划(2022PT-13);陕西省科技厅区域创新能力引导计划(2021QFY04-03)

作者简介:郑洁文,在读硕士,研究方向:固体废弃物生态化利用,E-mail:zhengjiewen496@163.com

通信作者:张凯煜,副教授,博士,主要从事固体废弃物处置及生态修复研究,E-mail:987083249@qq.com

consisted of 30% of fly ash compost and vermiculite at a ratio of 1:2.

Keywords: seedling substrate; fly ash; tomato seedlings; physicochemical properties

无土栽培技术以基质栽培为主要形式,越来越多地被用于种植花卉和蔬菜,同时也受到了更多关注和研究^[1-2]。育苗基质不仅在某种程度上用来取代土壤,也可以逐步把对土地结构的破坏程度减少,还具有高效、价格低、方便开展机械化管理、远距离移栽与运输等突出优势^[3]。传统园艺基质通常由草炭、珍珠岩和蛭石等原料组成,全球每年产出大约9 000 m³的草炭。然而,过度开采草炭会严重破坏环境,一些欧洲国家制定了限制草炭开采的政策^[4]。近年来,我国草炭资源的匮乏,造成了草炭种苗的底物供给严重不足,草炭的过度开发还会对湿地生态系统造成损害,加剧气候变化。陕西省作为煤炭大省,2022年粉煤灰产生量约1 500万~1 800万t,占全国总量的5%,主要集中在榆林、延安等煤炭富集区。作为火力发电的副产物,粉煤灰具有小球状、网格状结构,具有疏松、多孔、透气、保水等特点,并含有大量的营养元素^[5],将其应用于基体制备,绿色、环保、廉价,既能实现对工业废料的高效资源化,还能实现环保效益。

基质能够代替土壤,对作物生长具有协调作用,是调节水、气、肥三大功能的物质基础。以往的研究表明^[6-8],粉煤灰与泥炭、菇渣和醋糟等有机物按照一定比例复配可形成优质的育苗和栽培基质,可以降低基质生产成本且拓展粉煤灰资源化利用途径。杨洋等^[9]研究表明,当粉煤灰、泥炭、木屑、稻壳以2:6:1:1的体积比复配后,提高了高羊茅的株高、盖度、分蘖数、地上生物量和地下生物量。杨博雯等^[10]研究表明,醋糟与粉煤灰混配可以调整基质的孔隙度,改善持水力,同时可以提高龙葵幼苗的出苗数、分蘖数、株高和生物量。

我国的粉煤灰利用率仅为25%,且大部分都集中在建筑和建材领域,而对其用于农业的研究还相对较少^[11]。

本研究根据榆林市现状,将工业废弃物粉煤灰、农业废弃物羊粪和秸秆进行混配,研究不同配比粉煤灰育苗基质条件下基质理化特性以及对番茄幼苗生长生理指标的影响,并通过主成分分析法筛选出适合番茄生长的适宜配比,旨在为固废资源循环利用和无土栽培基质开发提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验所用粉煤灰由国能锦界能源有限责任公司提供;羊粪从榆林市养羊场购买;玉米秸秆采自陕西榆林玉米田,粉碎至2~3 cm后备用;蛭石购自泰安三石科技有限公司,粒径为3~6 mm。供试番茄品种为金牌全能,购自榆林市种子公司;草炭购自河南省环硕园林绿化工程有限公司。

1.2 试验设计

试验于2022年6—12月在陕西省榆林市陕西省矿区生态修复重点实验室的温室内进行。将羊粪、玉米秸秆按体积比1:1复配,通过控制粉煤灰比例(10%、30%)进行复配,所有处理含水量保持在60%左右,放入专用堆肥桶中进行好氧堆肥,经35 d堆置后,达到无害化处理(连续7 d保持50℃以上)。经过好氧堆肥的混合基质与蛭石按照不同体积比进行混合配制(表1),共设置7个处理,每个处理3次重复。育苗选用美式黑塑72孔穴盘,挑选颗粒饱满完整的番茄种子,用55~60℃温汤浸种30 min后进行催芽。挑选露白达到75%以上的种子进行播种,每个处理1盘,每穴播1粒,播种结束后将穴盘置于温室内,育苗周期为25 d,育苗过程中根据苗情定期补充水分。

表1 育苗基质的不同体积配比

处理 Treatment	基质配方成分 Ingredients of the substrate formulation	体积比 Volume ratio
M11	粉煤灰腐熟料(含10%粉煤灰):蛭石	1:1
M12	粉煤灰腐熟料(含10%粉煤灰):蛭石	1:2
M14	粉煤灰腐熟料(含10%粉煤灰):蛭石	1:4
H11	粉煤灰腐熟料(含30%粉煤灰):蛭石	1:1
H12	粉煤灰腐熟料(含30%粉煤灰):蛭石	1:2
H14	粉煤灰腐熟料(含30%粉煤灰):蛭石	1:4
CK	草炭:蛭石	2:1

1.3 测定项目及方法

1.3.1 粉煤灰混合基质重金属潜在生态风险评价 根据王晓睿等^[12]使用的评价方法及分级标准对该粉煤灰混合基质重金属进行评价,潜在生态风险评价参照HAKANSON^[13]。

$$E_r^i = T_r^i \frac{C_i}{C_n^i} \quad (1)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (2)$$

其中, RI 为粉煤灰堆场基质中多种重金属潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性系数; C_i 为单一元素实测值; C_n^i 为单一元素参比值。

5 种重金属元素毒性系数 $Pb=5$ 、 $Cd=30$ 、 $Cr=2$ 、 $As=10$ 、 $Hg=40$ ^[14]。将重金属的潜在生态风险系数分为 5 个等级, 潜在生态风险指数划分为 4 个等级(表 2)。

表 2 潜在生态风险系数(E_r^i)和风险指数(RI)与风险等级的关系

Tab.2 The relationship between E_r^i , RI and degree

E_r^i	RI	潜在生态风险等级 Degree of potential ecological risk
<40	<150	低
$\geq 40 < 80$	$\geq 150 < 300$	中等
$\geq 80 < 160$	$\geq 300 < 600$	强
$\geq 160 < 320$	≥ 600	很强
≥ 320		极强

1.3.2 基质理化性质测定 育苗前测定基质理化性质。采用李耀龙等^[15]的方法测定粉煤灰育苗基质容重、孔隙度、气水比等物理特性。用 pH 酸度计(PHSJ-3F)测量 pH 值, 用雷磁电导率仪(DDS-307A)测量 EC 值。采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量, 采用碱解扩散法测定碱解氮含量, 速效磷含量采用钼锑抗比色法测定, 速效钾含量采用火焰光度法测定^[16]。

1.3.3 番茄幼苗生长指标的测定 待幼苗长至 2 片

真叶时, 每个重复随机挑选 10 株正常生长的番茄幼苗, 每隔 5 d 记录一次数据。测量番茄幼苗的株高和茎粗, 并用天平测定其地上部分和地下部分鲜质量, 番茄幼苗烘干后测定其干质量, 计算根冠比及壮苗指数。

1.3.4 番茄幼苗生理指标的测定 叶绿素含量使用叶绿素仪测定, 采用硫代巴比妥酸法(TBA)测定丙二醛(MDA)含量^[17], 利用氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性, 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定, 采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[18]。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2022 软件和 Origin 2022 进行数据处理和作图, 采用 SPSS 26 软件对试验数据进行差异性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 粉煤灰混合基质的生态风险评价

将煤基固废应用于育苗基质是否会重金属超标, 从而影响健康是人们关注的焦点。本试验中利用不同配比粉煤灰混合基质育苗, 在对育苗基质进行评价的同时, 也对添加粉煤灰的混合基质是否会带来生态风险进行评价。由表 3 可知, 经过好氧堆肥后的粉煤灰基质中的 5 种重金属潜在生态风险系数均小于 40, 潜在生态风险指数小于 150, 根据相对应的生态风险等级标准, 在每种处理中加入不同比例的粉煤灰混合基质的潜在生态风险水平是低风险, 因此, 可以认为本试验中所使用粉煤灰对育苗基质造成重金属污染的生态风险较低。

表 3 粉煤灰混合基质重金属潜在生态风险评价

Tab.3 Potential ecological risk assessment of heavy metals in fly ash composite substrates

处理 Treatment	E_r^i					RI	生态风险等级 Ecological risk level
	Pb	Cd	Cr	As	Hg		
10% 粉煤灰好氧堆肥基质 10% of fly ash aerobic composting substrate	0.17	14.35	0.07	2.77	0.04	17.4	低
30% 粉煤灰好氧堆肥基质 30% of fly ash aerobic composting substrate	0.16	9.50	0.11	4.70	0.47	14.94	低

2.2 不同配比粉煤灰育苗基质的物理性质分析

从表 4 可以看出, H11 处理的容重最大, 为 0.36 g/cm^3 , 所有处理的容重较 CK 显著提高($P < 0.05$), 分别提高了 2.33 倍、2.33 倍、1.44 倍、3.00 倍、2.44 倍和 1.44 倍。各处理的总孔隙度在 53.27%~62.07%, M12 处理的总孔隙度与 CK 相比, 增加了 10.78%。各处理的通气孔隙度为 10.00%~15.60%,

M11、M12 和 M14 处理的通气孔隙度整体略高于 H11、H12 和 H14 处理。持水孔隙度最大的是 M12 处理(46.63%), CK 与其他处理间差异不显著。各组处理的气水比在 0.22~0.42, H 组的气水比较小, M 组的气水比最大, 相同粉煤灰含量的组中随着蛭石的增加气水比呈现递增趋势。

表4 不同配比粉煤灰育苗基质的物理性质

Tab.4 Physical properties of seedling substrates with different fly ash proportions

处理 Treatment	容重/(g/cm ³) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	通气孔隙度/% Aeration porosity	持水孔隙度/% Water-holding porosity	气水比 AFP/WRP
M11	0.30±0.01b	59.67±0.03a	14.43±0.01a	45.20±0.02ab	0.32±0.02ab
M12	0.30±0.01b	62.07±0.00a	15.43±0.01a	46.63±0.01a	0.33±0.03ab
M14	0.22±0.01c	53.53±0.06a	15.60±0.02a	37.93±0.05b	0.42±0.07a
H11	0.36±0.00a	55.03±0.01a	10.00±0.00b	45.07±0.01ab	0.22±0.01b
H12	0.31±0.01b	55.67±0.02a	12.27±0.02ab	43.33±0.01ab	0.28±0.03b
H14	0.22±0.02c	53.27±0.02a	11.80±0.02ab	41.47±0.02ab	0.29±0.04b
CK	0.09±0.00d	56.03±0.03a	13.57±0.01ab	42.43±0.02ab	0.32±0.01ab

注:同列后不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。表5同。

Note: Different lowercase letters in the same column were significant differences between treatments at the 0.05 level. The same as Tab.5.

2.3 不同配比粉煤灰育苗基质的化学性质分析

从表5可以看出,除M11处理的pH值大于8,其余各组配比的基质均在7~8,均大于CK。EC值方面,呈现一种递减的趋势。各处理的EC值在1.73~7.07 mS/cm。相对于CK,M11处理的EC值提高了3.09倍;不同配比粉煤灰育苗基质处理中,CK的有机质含量最高,与M11处理间差异不

显著,但显著高于其他处理($P<0.05$)。不同配比粉煤灰育苗基质的有机质含量随着粉煤灰及蛭石的增加而降低。M11处理的碱解氮含量最高,较CK增加70.38%。M11处理的速效磷含量最高,比CK高14.35%,其余各处理呈递减趋势。M11处理的速效钾含量最高,H11处理和M12处理次之,M14、H12和H14处理与CK间无显著差异。

表5 不同配比粉煤灰育苗基质的化学性质

Tab.5 Chemical properties of seedling substrates with different fly ash proportions

处理 Treatment	pH	EC/(mS/cm)	有机质/(g/kg) Organic matter	碱解氮/(mg/kg) Available nitrogen	速效磷/(mg/g) Available phosphorus	速效钾/(mg/g) Available potassium
M11	8.17±0.06a	7.07±0.13a	209.87±17.84a	328.70±0.98a	318.85±1.98a	13.37±0.01a
M12	7.72±0.30b	5.61±0.59b	178.47±9.46b	254.04±6.78b	308.15±2.40b	9.57±0.02b
M14	7.70±0.06b	4.94±0.25c	173.18±4.84b	156.19±2.95f	296.27±1.27c	7.55±1.76c
H11	7.57±0.04bc	3.73±0.06d	180.57±2.86b	229.84±2.71c	295.16±0.73c	9.52±0.02b
H12	7.32±0.02c	2.89±0.03e	151.72±8.59c	197.28±1.33d	285.11±0.99d	7.35±0.06c
H14	7.32±0.24c	2.07±0.04e	139.47±8.34c	173.14±2.62e	278.53±1.04e	6.36±0.03c
CK	6.23±0.02d	1.73±0.06f	210.84±12.53a	192.92±1.53d	278.84±2.10e	7.43±0.06c

2.4 不同配比粉煤灰育苗基质下番茄幼苗的株高、茎粗分析

从图1可以看出,在育苗的5、10 d内,M14处理的株高最高;在育苗后的15 d,H12处理的株高

最高,比CK高14.55%;育苗后的20 d,H处理的株高于M处理,推测粉煤灰的添加促进了番茄幼苗株高的生长。综上,H12处理的番茄幼苗生长状况最好,其次依次是H11、M14处理。



柱形图上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。图2—5同

Different lowercase letters in the figure indicated significant differences($P<0.05$). The same as Fig.2-5

图1 不同配比粉煤灰育苗基质下番茄幼苗的株高

Fig.1 Plant height of tomato seedlings under different proportions of fly ash seedling substrates

从图2可以看出,育苗5 d后,M12处理的茎粗最大,为1.19 mm,H12处理的茎粗最小,二者相差0.21 mm;育苗后10 d,各处理的茎粗均大于CK,H11处理的茎粗最大,其次依次是M14、H12;育苗后15 d,H11处理的茎粗高于其他处理,其次依次

是H12、M14处理,M11处理的茎粗最小;在20 d时,M14处理比M11、M12、H11、H12、H14处理和CK分别高29.71%、20.13%、9.05%、3.47%、11.18%和27.86%。

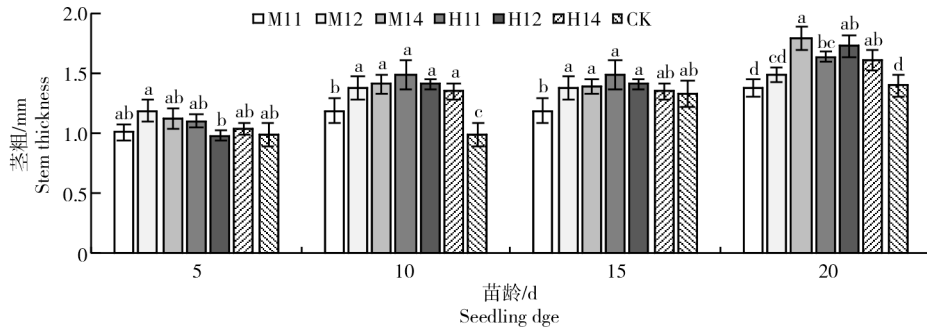


图2 不同配比粉煤灰育苗基质下番茄幼苗的茎粗

Fig.2 Stem thickness of tomato seedlings under different proportions of fly ash seedling substrates

2.5 不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗生物量、根冠比及壮苗指数的影响

由图3可知,地上部分鲜质量M14处理最大,

M11处理最小;地下部分鲜质量中H12处理最大,为15.52 mg,显著高于M11、M12、H11、H14处理和CK($P < 0.05$),与M14处理间无显著差异。

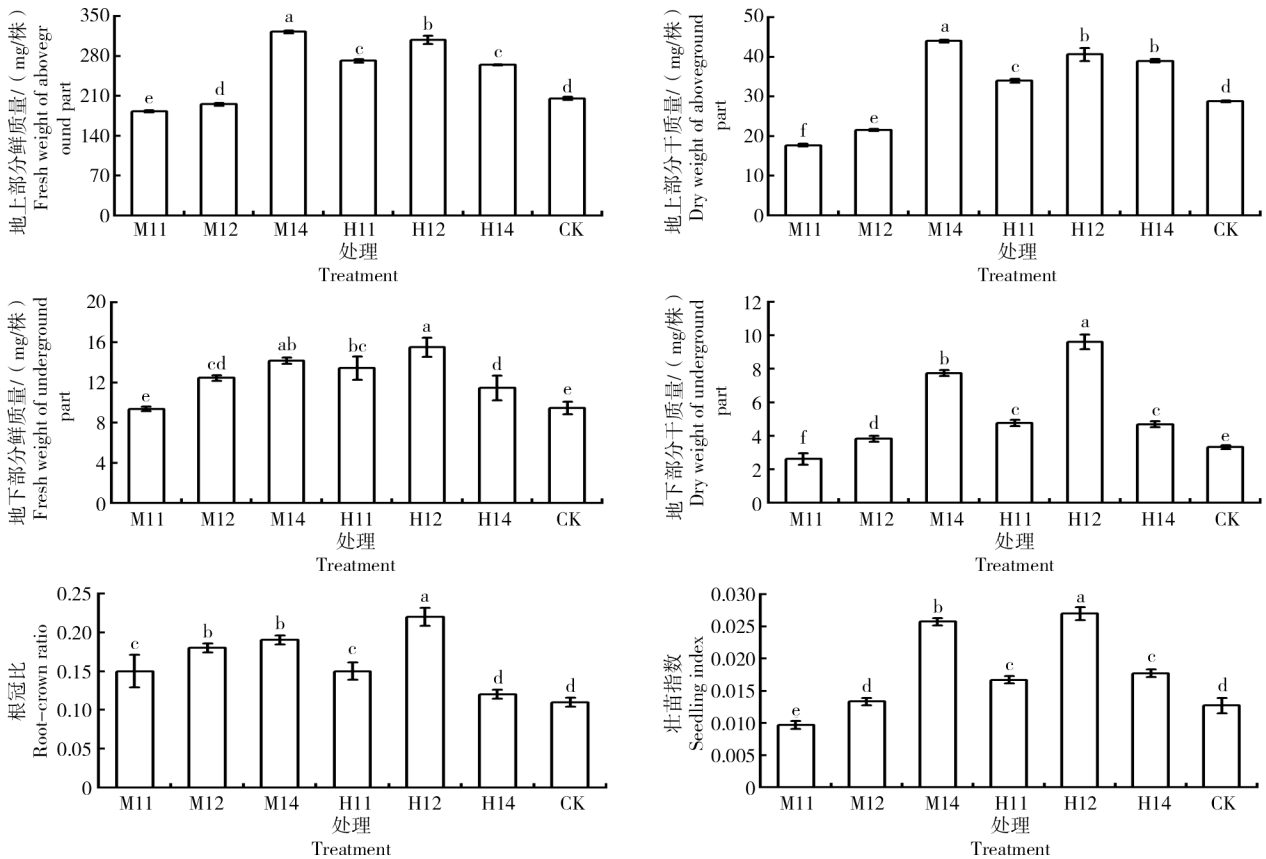


图3 不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗生物量、根冠比及壮苗指数的影响

Fig.3 Effect of different proportions of fly ash seedling substrates on biomass, root-crown ratio, and seedling index in tomato seedlings

地上部分干质量以M14处理最大,其次为H12处理,M11处理的地上部分干物质量最小;在地下部分干质量方面,H12处理的干质量最大,其次为M14和H11处理,M11处理的干质量最小。H12处理的根冠比显著高于其他处理,较CK提高1倍,M11、M12、M14和H11处理与CK差异显著($P<0.05$)。H12处理的壮苗指数显著高于其他处理,较CK增加了1.13倍。M11处理低于CK,其他

处理均高于CK,M12处理与CK的壮苗指数间无显著差异(图3)。

2.6 不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗生理指标的影响

2.6.1 不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗抗氧化酶活性和MDA含量的影响

不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗抗氧化酶活性和MDA含量的影响如图4所示。

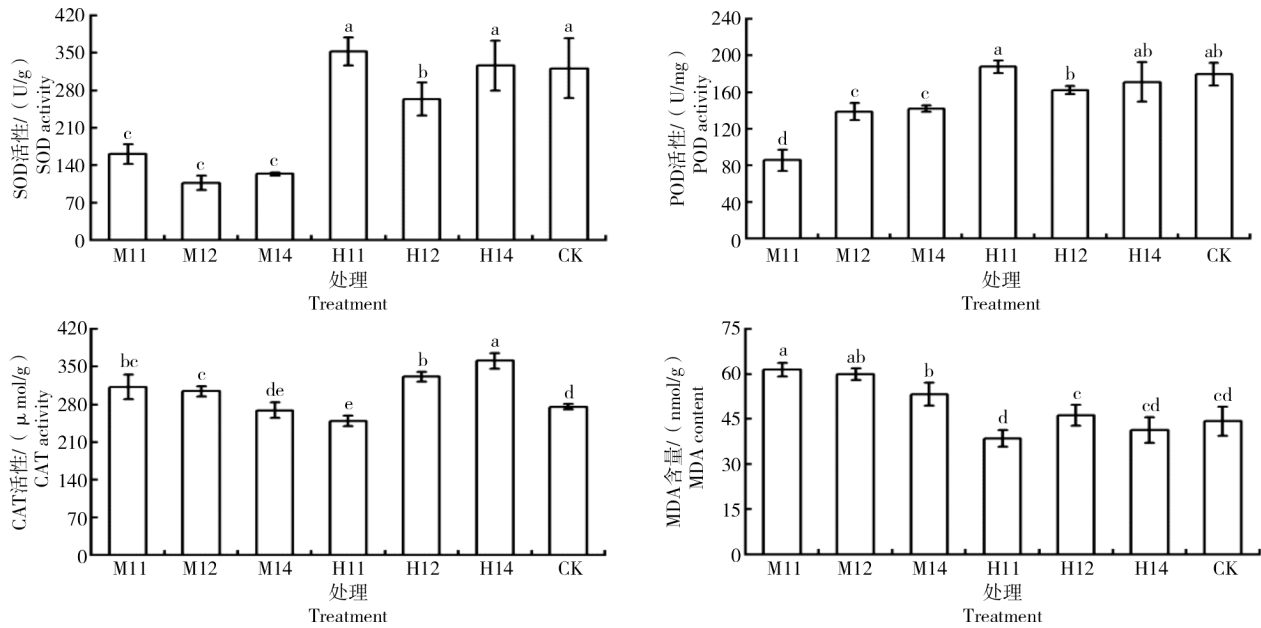


图4 不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗抗氧化酶活性和MDA含量的影响

Fig.4 Effect of different proportions of fly ash seedling substrates on antioxidant enzyme activity and MDA content in tomato seedlings

由图4可知,M11、M12、M14处理的SOD活性明显低于CK与其他处理,H14处理的SOD活性与CK无明显差异。H11处理的POD活性最高,M11处理的POD活性最低,H11处理比CK高4.49%。不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗CAT活性整体表现为H14>H12>M11>M12>CK>M14>H11,M11、M12、H12和H14处理均显著高于CK($P<0.05$)。M11处理的MDA含量显著高于M14、H11、H12、H14处理和CK($P<0.05$);与M12处理间无显著差异。

理($P<0.05$),含30%粉煤灰处理的叶绿素含量整体水平高于含10%粉煤灰处理。

2.6.2 不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗叶绿素含量的影响

从图5可以看出,番茄幼苗叶绿素含量的大小排序为H11>H12>M12>CK>H14>M14>M11。H11处理的叶绿素含量最高,与CK相比,增加10.49%,其次是H12处理。从整体来看,M12、H11和H12处理均显著高于其他处

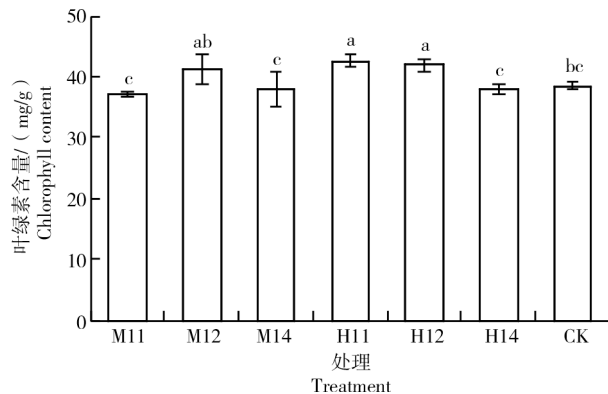


图5 不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗叶绿素含量的影响

Fig.5 Effect of different proportions of fly ash seedling substrates on chlorophyll content in tomato seedlings

2.7 不同配比粉煤灰育苗基质下番茄幼苗生长指标综合评价

通过上述指标分析可以看出,不同配比粉煤灰育苗基质对番茄幼苗均有一定的影响。因此,利用指标之间的相关性进行主成分分析及建立综合效应评价,通过计算每个因素处理综合得分,可以获得综合性能更好的配比基质。

从图6可以看出,13个指标之间具有一定的相关性,因此,可以进行主成分分析。对指标进行主成分分析后,转换为2个新的综合指标,分别为

Y1、Y2。各项指标的数据标准化处理后,将主成分 Y1、Y2 代入综合评价方程 Y,得出各处理的综合得分。

$$Y1 = -0.293X1 - 0.129X2 - 0.241X3 - 0.319X4 - 0.274X5 - 0.305X6 + 0.323X7 + 0.299X8 + 0.322X9 + 0.345X10 + 0.248X11 + 0.286X12 + 0.100X13 \quad (3)$$

$$Y2 = 0.120X1 + 0.434X2 + 0.361X3 + 0.134X4 + 0.324X5 + 0.193X6 + 0.016X7 + 0.264X8 + 0.193X9 + 0.047X10 + 0.340X11 + 0.266X12 + 0.459X13 \quad (4)$$

$$\text{综合评价方程 } Y = 0.693Y1 + 0.307Y2 \quad (5)$$

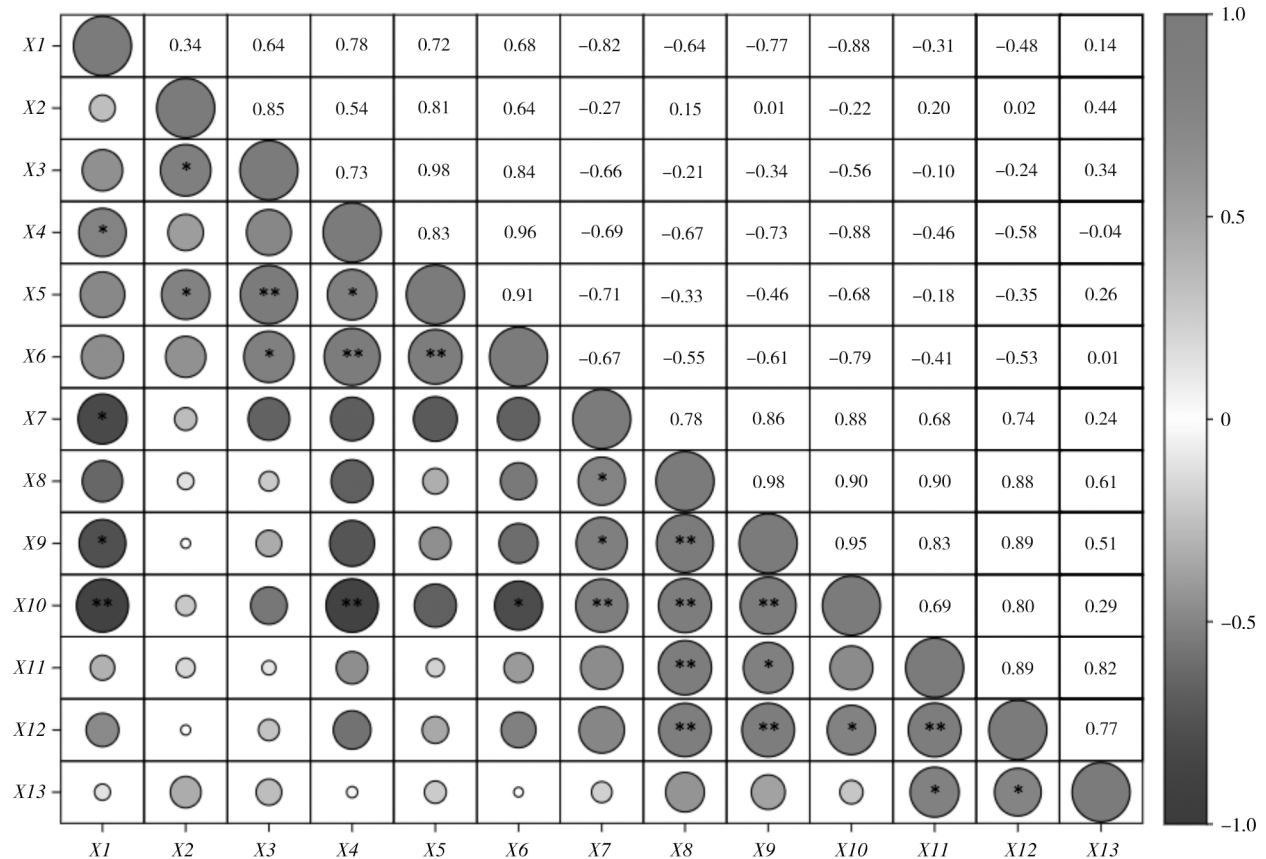


图6 不同配比粉煤灰育苗基质的理化性质与番茄幼苗生长指标的相关性
X1. 总孔隙度; X2. pH; X3. EC; X4. 碱解氮; X5. 速效磷; X6. 速效钾; X7. 株高; X8. 茎粗; X9. 地上部分鲜质量; X10. 地上部分干质量; X11. 地下部分鲜质量; X12. 地下部分干质量; X13. 根冠比。不同颜色表示指标之间的相关性,*表示显著相关(P<0.05),**表示极显著相关(P<0.01)

X1. Total porosity; X2. pH; X3. EC; X4. Available nitrogen; X5. Available phosphorus; X6. Available potassium; X7. Stem length; X8. Stem thickness; X9. Fresh weight of aboveground part; X10. Dry weight of aboveground part; X11. Fresh weight of underground part; X12. Dry weight of underground part; X13. Root-crown ratio. Different colors indicate the correlation between indicators, * indicated significant correlation(P<0.05), ** indicated extremely significant correlation(P<0.01)

图6 不同配比粉煤灰育苗基质的理化性质与番茄幼苗生长指标的相关性

Fig.6 Correlation between physicochemical properties of different proportions of fly ash seedling substrates and growth index of tomato seedlings

将不同基质配比下番茄幼苗生长指数数据进行综合评价,结果如表6所示,H12处理得分最高,

为2.54,有较大优势。不同处理的得分大小依次为H12>M14>H14>H11>CK>M12>M11。

表6 主成分因子的综合得分评价

Tab.6 Evaluation of comprehensive scores of principal component factors

处理 Treatment	Y1	Y2	Y	排名 Ranking
M11	-4.78	0.9	-3.03	7
M12	-2.66	0.86	-1.58	6
M14	2.43	1.61	2.18	2
H11	0.56	0.3	0.48	4
H12	3.01	1.47	2.54	1
H14	1.71	-1.69	0.67	3
CK	-0.28	-3.46	-1.26	5

3 结论与讨论

3.1 粉煤灰育苗基质物理性质对番茄幼苗的影响

粉煤灰不仅可以提高作物产量和品质、防治病虫害、控制杂草生长,而且还能提高水资源利用率,改良荒漠土壤,在农业生产上得到利用^[19]。基质的构成取决于水分、养分的吸附性能和空气含量,从而调控植物对水分和养分的吸收、转运及利用效率。因此,基质的物理、化学特性和幼苗的生长发育状况有关,其容重和孔隙度是控制植株生长发育的主要原因^[20]。容重大小变化受控于基质粒径分布与总孔隙度协同作用,容重偏高时,基质呈现致密化堆积状态,虽能提升持水容量,但导致孔隙气体交换受阻;容重偏低时,基质则形成松散型架构,虽增强通气度,却造成水分保持能力弱化,同时引发根系固着稳定性下降^[21]。李谦盛^[22]研究结果显示,理想的基质容重是 $0.1\sim 0.8\text{ g/cm}^3$,通气孔隙度在 $15\%\sim 30\%$ 。张强等^[11]研究认为,根际环境中总孔隙度应在 $54\%\sim 95\%$ 、持水孔隙度在 $40\%\sim 75\%$ 、气水比为 $0.25\sim 0.50$ 时,才能有利于植物根系的生长和发育,进而促进幼苗生长。在本研究中,容重除CK外,其他处理均在标准范围内,孔隙度、气水比均能满足理想基质的要求。M11和M12处理的总孔隙度和持水孔隙度高于其他处理。说明适当增加粉煤灰在基质中的比例,有助于基质孔隙度状况的改善^[23]。

3.2 粉煤灰育苗基质化学性质对番茄幼苗的影响

张秀丽^[24]研究表明,pH值在 $6.0\sim 7.5$ 的基质较为理想。一般来说,EC值在 $0.75\sim 3.49\text{ mS/cm}$ ^[25]。在本研究中,除M11处理的pH值大于8外,其余各处理的pH值介于 $7\sim 8$ 。因pH和EC与基质可溶

性盐密切相关,故推测当地的水质为碱性。本研究表明,添加30%粉煤灰的pH较10%粉煤灰的pH低,说明粉煤灰经过堆肥,其中微生物繁殖产生有机酸会引起pH值下降,这与前人研究相似^[26]。H11、H12和H14处理的EC值符合标准范围,而M11、M12、M14处理的EC值偏高。H处理组的EC值比M处理组的EC值低,推测粉煤灰的添加降低了基质的EC值。育苗基质中含有氮、磷和钾等营养元素,这些营养元素对植物的生长和发育至关重要。M11处理的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量最高,与其他处理间差异显著。说明蛭石与粉煤灰比例的增加降低了基质中的养分含量。

3.3 粉煤灰育苗基质对番茄幼苗生长和生理的影响

株高和茎粗是植物的重要生长指标,可以直观地体现植物的生长发育情况^[27]。番茄幼苗的生物量是干物质累积的一个指标,也可以体现植物当前的生长情况^[28]。董娇等^[29]研究了4种基质对油松容器苗叶长、叶面积、苗高、地径、冠幅和生物量等的影响,结果表明,育苗基质对油松苗的生长均有促进作用。PANDA等^[30]研究表明,在土壤中添加50%的粉煤灰可明显增加植物的生物量。杨军等^[31]研究显示,壮苗指数、G值等与番茄前期产量之间存在显著的正相关关系,因此,这些因素可以作为主要指标用于评估番茄幼苗品质,并更好地预测番茄产量。根冠比是反映植物对土壤水分吸收利用和植物遭受干旱胁迫时生物量分配的重要指标^[32]。光能的吸收、传递和转化是叶绿素在植物光合过程中的重要体现^[33]。丙二醛(MDA)是一种膜脂质过氧化物质,在植物损伤和老化期间,活性氧物质的积累引起膜脂质过氧化,因此,植物的氧化胁迫与MDA含量成正比,这也是测定膜质过氧化的重要指标^[34]。本试验中,H12处理的株高、壮苗指数和叶绿素含量最高;H11处理的MDA含量最小,说明H11处理的基质很大程度上提高了番茄幼苗抗逆性,促进了番茄幼苗的生长发育,使得番茄幼苗中的MDA含量明显减少;H11、H14处理的SOD活性与CK间无明显差异,且显著高于其他处理,推测添加了更高比例的粉煤灰的基质增加了番茄幼苗的抗性;H11处理的POD活性最高,而CAT活性则在所有处理中最低,可能是由于CAT与POD的相互协同作用,

CK 也呈现了相同的规律。综上,粉煤灰可以用作基质用于育苗,提高番茄幼苗的代谢水平,促进番茄幼苗的生长发育。

粉煤灰用于无土栽培育苗是可行的,作为育苗基质重金属潜在生态风险低,不同配比粉煤灰与蛭石混配后的育苗基质均符合育苗基质的物理性质,处于理想基质的范围。综合评价表明,H12 处理为最佳;M14 处理次之,综合得分高于对照,更加适合用于番茄育苗,提高了育苗效果。从资源化利用角度出发,H12 处理利用了更多的粉煤灰及农业固废,既为固体废弃物找到了处理方式,又有利于生态保护,还提高了生物量。因此,生产上可以选用 H12 处理(30% 粉煤灰堆肥基质:蛭石=1:2)作为番茄育苗的基质。

参考文献:

- [1] 孙锦,李谦盛,岳冬,等.国内外无土栽培技术研究现状与应用前景[J].南京农业大学学报,2022,45(5):898-915.
SUN J,LI Q S,YUE D,et al. Research status and application prospects of soilless culture technology in the world[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022, 45(5):898-915.
- [2] 王媛,李文庆,李晗灏.生物炭与草炭混配基质的养分状况及其对凤仙花生长的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(5):656-663.
WANG Y,LI W Q,LI H H. Effect of biochar and peat on the growth of *Impatiens balsamina* as a growth medium[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(5):656-663.
- [3] 李长文,李均,顾亚东,等.穴盘育苗基质与膨化消毒鸡粪肥料配比试验研究[J].上海农业科技,2005,35(6):137-138.
LI C W,LI J,GU Y D,et al. Experimental study on the ratio of hole tray seedling substrate to expanded and sterilised chicken manure fertilizer[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2005, 35(6):137-138.
- [4] 王拉花,杨秋生.新型园艺栽培基质研究进展[J].河南农业科学,2015,44(3):9-13.
WANG L H,YANG Q S. Research progress on new horticultural culture substrates[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(3):9-13.
- [5] 冯培峰.电厂粉煤灰高值化利用现状与最新进展[J].中国资源综合利用,2020,38(11):100-104.
FENG P F. Progress and development of high value utilization for coal fly ash from power plant[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(11):100-104.
- [6] 张强,朱益赫,赵永志,等.利用粉煤灰配制筛选黄瓜和娃娃菜的育苗基质[J].北京农学院学报,2018,33(2):38-42.
ZHANG Q,ZHU Y H,ZHAO Y Z,et al. Using the fly ashes plant substrate to grow cucumber and baby Chinese cabbage[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2018, 33(2):38-42.
- [7] 牛常青,杨艳君,王向东,等.醋糟粉煤灰不同比例混合基质对高羊茅生长的影响[J].晋中学院学报,2010,27(3):51-54.
NIU C Q,YANG Y J,WANG X D,et al. Effect on the growth of *Festuca arundinacea* with different ratios with coal ash and vinegar[J]. Journal of Jinzhong University, 2010, 27(3):51-54.
- [8] 高亚娟,徐福蕾,黄武建,等.粉煤灰-木薯渣-蚯蚓粪基质的栽培效果研究[J].北方园艺,2014(23):165-168.
GAO Y J,XU F L,HUANG W J,et al. Effect of fly ash-cassava dregs-vermicompost substrate cultivation[J]. Northern Horticulture, 2014(23):165-168.
- [9] 杨洋,尹淑霞.粉煤灰与无土基质混合对高羊茅生长的影响[J].草原与草坪,2012,32(1):42-45.
YANG Y,YIN S X. Influence of fly ash and soilless substrates on the growth of tall fescue[J]. Grassland and Turf, 2012, 32(1):42-45.
- [10] 杨博雯,底庭伟,姚淑姣,等.醋糟与粉煤灰不同配比对龙葵生长的影响[J].山西农业科学,2017,45(4):581-583.
YANG B W,DI T W,YAO S J,et al. Effect of different matching with fly ash and vinegar on the growth of *Solanum nigrum*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(4):581-583.
- [11] 张强,王顺利,曲明山,等.以粉煤灰为主要原材料的黄瓜育苗基质配方筛选[J].北方园艺,2018(21):17-21.
ZHANG Q,WANG S L,QU M S,et al. Screening of cucumber nursery matrix formulation with fly ash as main raw material[J]. Northern Horticulture, 2018(21):17-21.
- [12] 王晓睿,高秉婷,吴永贵,等.粉煤灰堆场基质-农作物系统中重金属生态风险及健康风险评估[J].有色金属(矿山部分),2021,73(6):116-124.
WANG X R,GAO B T,WU Y G,et al. Ecological risk and health risk assessment of heavy metals in fly ash yard matrix-crop system[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(6):116-124.
- [13] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [14] 徐争启,倪师军,庾先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
XU Z Q,NI S J,TUO X G,et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2):112-115.
- [15] 李耀龙,季延海,于平彬,等.基于不同基质理化特性的无土栽培混合基质筛选[J].北方园艺,2016(8):36-40.
LI Y L,JI Y H,YU P B,et al. Screening test for mixed soilless culture matrix based on different physical and chemical properties[J]. Northern Horticulture, 2016(8):36-40.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:25-109.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press,2000:25-109.
- [17] 李浩铭.不同光照强度和基质对伯乐树幼苗生长及相关生理指标的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
LI H M. Effects of different light intensity and substrate on the growth and related physiological indexes of *Bretschneidera*

- sinensis*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.
- [18] 石玉. 外源硅对番茄幼苗水分胁迫伤害的缓解效应及机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
SHI Y. Study on alleviative effects of exogenous silicon on water stress-induced injury and the underlying mechanisms in tomato seedlings[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [19] 王凯, 袁喆, 罗根华, 等. 粉煤灰添加对草地早熟禾种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37(1): 70-75.
WANG K, YUAN Z, LUO G H, et al. Effect of fly ash addition on seed germination and seedling growth of *Poa pratensis* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(1): 70-75.
- [20] 高婷, 沙毓沧, 陆琳, 等. 不同基质配比对白菜生长的影响[J]. 北方园艺, 2021, 45(7): 33-37.
GAO T, SHA Y C, LU L, et al. Effects of different substrate formulation on the growth of Chinese cabbage seedlings[J]. Northern Horticulture, 2021, 45(7): 33-37.
- [21] 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. Effects of different substrate ratios on the growth of six species of *Cyclobalanopsis*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 532-539.
- [22] 李谦盛. 芦苇末基质的应用基础研究及园艺基质质量标准的探讨[D]. 南京:南京农业大学, 2003.
LI Q S. The study on application basics of reed residue substrate and discussion on the quality standard of horticultural substrate[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [23] 倪琳. 不同比例腐解秸秆及生物质炭代替泥炭用作番茄育苗基质研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2021.
NI L. Study on different proportion of humified corn straw and biochar instead of peat as tomato seedling substrate[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.
- [24] 张秀丽. 秸秆型育苗基质理化性质的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(19): 8967-8968.
ZHANG X L. Research on the physical and chemical properties of straw seedling substrates[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(19): 8967-8968.
- [25] GARCIA-GOMEZ A, BERNAL M P, ROIG A. Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(2): 81-87.
- [26] 黄宏林, 何广聪, 覃侠龙, 等. 粉煤灰对牛粪好氧堆肥进程的影响[J]. 养殖与饲料, 2021, 20(1): 10-14.
HUANG H L, HE G C, TAN X L, et al. Effect of fly ash on the aerobic composting process of cattle manure[J]. Animals Breeding and Feed, 2021, 20(1): 10-14.
- [27] 许继飞, 康振中, 赵吉, 等. 煤基固废与牲畜粪便固态发酵基质改良沙土的研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(7): 160-166.
XU J F, KANG Z Z, ZHAO J, et al. The amelioration of sandy soil using the solid fermentation mixture of the based-coal solid waste and the livestock excrement[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(7): 160-166.
- [28] 车艳丽, 李彦明, 杨其长, 等. 酒糟沼渣在番茄基质育苗上的应用[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 88-98.
CHE Y L, LI Y M, YANG Q C, et al. Application of biogas residue of distiller grains in tomato substrate seedling[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(1): 88-98.
- [29] 董娇, 韩有志, 李娇娇, 等. 不同基质组成对油松容器苗生长状况的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(4): 624-627.
DONG J, HAN Y Z, LI J J, et al. Effects of different matrix compositions on the growth status of pinus tabulaeformis container seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(4): 624-627.
- [30] PANDA D, MANDAL L, BARIK J, et al. Physiological response of metal tolerance and detoxification in *Castor*(*Ricinus communis* L.) under fly ash-amended soil[J]. Heliyon, 2020, 6(8): e04567.
- [31] 杨军, 邵玉翠, 仁顺荣, 等. 不同基质配方对番茄冬季育苗的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 223-226.
YANG J, SHAO Y C, REN S R, et al. Effects of different substrates formula on tomato seedlings growth in winter[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 223-226.
- [32] 李斐, 孙明伟, 钟尚志, 等. 不同光合类型牧草对干旱-复水的光合生理响应及生长适应策略[J]. 植物生态学报, 2022, 46(1): 74-87.
LI F, SUN M W, ZHONG S Z, et al. Photosynthetic physiology and growth adaptation of herbages with different photosynthetic pathways in response to drought-rehydration[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(1): 74-87.
- [33] 刘婷婷, 陈道钜, 王仕稳, 等. 不同品种高粱幼苗在干旱复水过程中的生理生态响应[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 100-110.
LIU T T, CHEN D Q, WANG S W, et al. Physio-ecological responses to drought and subsequent re-watering in sorghum seedlings[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(6): 100-110.
- [34] 郑州元. 硫化氢调控盐胁迫下加工番茄种子萌发及幼苗生长的生理机制研究[D]. 石河子:石河子大学, 2017.
ZHENG Z Y. Physiological mechanisms of hydrogen sulfide in regulating seed germination and seedlings growth of processing tomato under NaCl stress[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.