

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.024

于全波, 王美艳, 田育天, 等. 混合方式对泡沫砂与土壤混合均匀性的影响. 土壤, 2020, 52(4): 825–830.

混合方式对泡沫砂与土壤混合均匀性的影响^①

于全波^{1,2}, 王美艳^{1,2*}, 田育天³, 史学正^{1,2}, 徐灵颖^{1,2}, 徐胜祥^{1,2}, 史艺杰^{1,2}, 李湘伟³, 谢新乔³

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 红塔烟草(集团)有限责任公司, 云南玉溪 653100)

摘要: 通过设置常规混合+风干态泡沫砂(CK)、常规混合+水浸态泡沫砂(1T)、常规混合+泥浆态泡沫砂(2T)、分层混合+风干态泡沫砂(3T)和分层混合+水浸态泡沫砂(4T) 5 个处理, 研究了不同混合方式对泡沫砂和土壤混合均匀性的影响, 并采用容重的标准差和变异系数表征混合均匀性。结果表明: 泡沫砂形态显著影响了混合均匀性。采用常规混合时, 水浸态泡沫砂显著增加了 0 ~ 10 cm 和 0 ~ 20 cm 土层混合均匀性, 容重的标准差比风干态泡沫砂分别降低了 188% 和 105%, 容重的变异系数分别降低了 62.1% 和 50.1%; 与风干态泡沫砂相比, 泥浆态泡沫砂不仅显著降低了不同土层的混合均匀性, 还显著降低了混合物内部的混合均匀性, 0 ~ 10 cm 土层容重的标准差和变异系数分别比 10 ~ 20 cm 土层显著增加 68.1% 和 50.8%。单变量分析表明, 混合方式对混合均匀性无显著性影响, 混合方式和泡沫砂形态之间无交互效应, 泡沫砂形态是影响泡沫砂和土壤混合均匀性的主要因素。采用水浸态泡沫砂在常规混合方式下与土壤混合, 不仅提高了混合物整体以及不同土层的混合均匀性, 而且还降低了不同层次之间混合均匀性的差异。因此, 建议采用常规混合+水浸态泡沫砂的方式混合土壤和泡沫砂。

关键词: 混合均匀性; 泡沫砂; 混合方式; 容重

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A

Effect of Mixing Methods on Mixing Uniformity of Porous Clay Ceramic and Soil

YU Quanbo^{1,2}, WANG Meiyang^{1,2*}, TIAN Yutian³, SHI Xuezheng^{1,2}, XU Lingying^{1,2}, XU Shengxiang^{1,2}, SHI Yijie^{1,2}, LI Xiangwei³, XIE Xinqiao³

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Hongta Tobacco Group Company Limited, Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: Five treatments were designed to investigate the effects of different mixing methods on the mixing uniformity of porous clay ceramic (PLC) and soil, including conventional mixing method + air-dried PLC(CK), conventional mixing method + water-immersed PLC(1T), conventional mixing method + mud-state PLC(2T), layered mixing method + air-dried PLC(3T) and layered mixing method + water-immersed PLC(4T). And the mixing uniformity is characterized by the standard deviation and variation coefficient of bulk density. The results showed that the form of PLC significantly affected the mixing uniformity. When conventional mixing was used, the water-immersed PLC significantly increased the mixing uniformity of 0–10 cm and 0–20 cm soil layers, and the standard deviation of bulk density was reduced by 188% and 105%, respectively, compared with the air-dried PLC; the variation coefficient of bulk density was reduced by 62.1% and 50.1%, respectively. The muddy PLC not only significantly reduced the uniformity of different soil layers mixed with PLC and soil, but also significantly increased the difference in mixing uniformity between 0–10 cm and 10–20 cm soil layers. The standard deviation and variation coefficient of bulk density in 0–10 cm soil layers were 68.1% and 50.8% significantly higher than 10–20 cm. Univariate analysis showed that the mixing method had no significant effect on the mixing uniformity, and there was no interaction between the mixing method and the forms of PLC. However, the form of PLC was the main factor affecting the mixing uniformity of PLC and soil. The use of

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41571209, 41401240)和红塔烟草(集团)有限公司科技项目(HT2016-6221)资助。

* 通讯作者(mywang@issas.ac.cn)

作者简介: 于全波(1990—), 男, 山东费县人, 博士研究生, 主要从事设施菜地土壤板结改良研究。E-mail:yuquanbo1990@163.com

water-immersed PLC mixed with the soil in a conventional mixing method not only improved the mixing uniformity of the whole mixture and different soil layers, but also reduced the difference in mixing uniformity between different layers, therefore, it is recommended for mixing soil and PLC.

Key words: Mixing uniformity; Porous clay ceramic; Mixing method; Bulk density

近几十年来,基质栽培在设施产业中得到广泛应用^[1-3]。物料混合是基质生产过程中的必要环节,其混合的均匀程度直接影响基质的性能^[4]。基质的物料组成多样^[5-7],这些物料往往在尺寸大小、状态和密度等方面存在差异,容易造成基质混合不均匀^[8-11],进而降低基质的性能,影响种苗生长状况。

在设施园艺中,目前关于基质的研究主要集中在不同物料对比对作物育苗、生长以及基质性能的影响^[7,12-13],但对于基质混合均匀性的研究很少。物料混合在化工、建材和制药等行业中也是非常重要的步骤^[14-15]。降低物料之间属性差异和改善混合方式是提高物料混合均匀性常用的方法。苏丽娜等^[16]分析集料组成及其粒径分布对沥青混合料均匀性的影响,发现去掉混合料中 ≥ 9.5 mm及 ≤ 2.36 mm粒径级配可以提高混合均匀性;钱达兴等^[17]在研究粒度分布变化对玻璃配合料混合均匀性的影响时,发现200目以下和40目以上的粒子可提高配合料的均匀性;庾正伟等^[18]选取形状和密度(容重)差异大的两组元颗粒——不锈钢微球和铝粉研究物料混合度的影响因素,发现颗粒湿润剂用量对混合均匀性影响最大。当物料的容重、大小等属性无法改变时,改变物料粗糙度、含水量也是常用的方法。许东来等^[19]采用一种混合装置将聚苯颗粒最大程度地粗糙化,提高了容重相差悬殊材料间混合的均匀度;胡俊生等^[4]将椰糠含水率调整为75%,将泥炭含水率调低,混合后基质成分均匀程度达最优标准。混合方式也是影响混合均匀性的因素之一。Li等^[20]在研究混合方法对传统水泥和嵌锁密实型水泥混凝土属性的影响时发现,双阶段混合提高了两种混凝土混合的均匀性,并且对于传统水泥,用糊状物包裹更合适,而对于嵌锁密实型水泥混凝土用灰泥先结合更适合。虽然减小物料粒径差异能够提高混合的均匀性,但势必也会降低物料性能,进而影响基质的性能。

泡沫砂是一种轻质材料,质地较轻,通气性好,通常在粒径 > 2 mm改善土壤通气性效果较好^[11, 21]。土壤也是基质常用物料^[22],但粒径组成复杂,容重较大^[23-24],因此,物料混合时容易出现混合不均匀的现象,影响基质性能。 < 200 目的土壤颗粒是土壤重要的组成部分,在实际应用中也不可能去掉。因此,

如何在保持粒径不变的情况下提高容重差异大的两种物料的混合均匀性急需解决。为此,本研究以土壤和泡沫砂为例,从改善混合方法角度出发,研究提高粒径和容重差异大的物料混合均匀性的方法,为提高基质性能提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究供试材料分为土壤和泡沫砂。供试土壤采集于南京市江宁区谷里镇设施菜地大棚,土壤类型为水稻土,质地为粉砂质黏壤土,容重为 1.3 g/cm^3 。土壤样品采集后,去除碎石、植物残茬后风干,研磨过2 mm筛备用。泡沫砂是一种经高温煅烧而成的无机改良剂,本研究选择2~7 mm粒径泡沫砂用于改良土壤板结,泡沫砂pH 8.64,风干状态泡沫砂的松散容重为 0.2 g/cm^3 。

1.2 试验设计

本试验设计了5个处理(表1),即3种泡沫砂形态和2种混合方法的组合。3种泡沫砂形态分别为风干态、水浸态和泥浆态。风干态泡沫砂为未经处理的泡沫砂;水浸态泡沫砂为用水浸泡24 h后的泡沫砂;泥浆态泡沫砂为用泥浆包裹后的泡沫砂,本试验泥浆由500 g过2 mm筛的风干土和500 ml水混合而成。2种混合方式分别是常规混合和分层混合。常规混合即将不同形态泡沫砂和风干土一次性人工混合;分层混合即将不同形态泡沫砂和风干土分别分成若干份,每份泡沫砂和风干土人工混合后再集中,本试验泡沫砂和土壤分别分成10份进行混合。

表1 泡沫砂和土壤混合试验设计
Table 1 Mixing test design of porous clay ceramic (PLC) and soil

处理	土壤(V/V, %)	泡沫砂(V/V, %)	泡沫砂形态	混合方式
CK	85	15	风干态	常规混合
1T	85	15	水浸态	常规混合
2T	85	15	泥浆态	常规混合
3T	85	15	风干态	分层混合
4T	85	15	水浸态	分层混合

1.3 物料装填与培养

采用E2号聚丙烯花盆装填土壤和泡沫砂混合

物,花盆尺寸:长×宽×高=35.5 cm×26.5 cm×21 cm。计算物料用量时,装填深度按照 20 cm、土壤容重按照 1.3 g/cm³、泡沫砂容重按照 0.2 g/cm³计算,因此,土壤和泡沫砂混合容重理论值为 1.14 g/cm³。根据表 1 试验设计进行装填,每个处理装填 3 个盆(3 个重复)。装盆时,每个处理混合约 2 min。装盆后,在中国科学院南京土壤研究所温室内进行培养,根据土壤干湿程度进行浇水。2 个月后进行采样分析。

1.4 样品采集与分析

表征固体混合均匀性通常采用混合物中某一组分含量的相对误差^[20]、标准差^[15]、变异系数^[25]和混合均匀度^[26]等。在物料混合时通常不需要考虑混合物的孔隙,甚至要降低孔隙。但对于设施栽培基质,孔隙对基质物理性能具有重要影响^[27-28]。土壤容重是土壤质地和孔隙状况的综合反映,决定着土壤的物理条件和多项生态、环境功能^[29]。因此,本研究采用容重的标准差和变异系数评价泡沫砂和土壤混合的均匀性。

容重采用环刀法测定^[30]。每盆(0~20 cm 土层)按照 0~10、10~20 cm 两层采集土壤环刀样品,每层采集 3 个。采集完成后将样品在烘箱中 105℃烘 48 h,测定容重(BD)。

容重的均值(\overline{BD})、标准差(SD)和变异系数(CV)计算方法分别见公式(1)、(2)和(3)。0~10 cm 和 10~20 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数采用对应土层的 3 个容重数据计算获得,0~20 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数由对应 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的 6 个容重数据计算获得。容重的标准差和变异系数越小,泡沫砂和土壤的混合均匀性越好^[19]。

$$\overline{BD} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n BD_i}{n} \right) \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (BD_i - \overline{BD})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$CV = \frac{SD}{\overline{BD}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $n=3$ 或者 6,当土层为 0~10 cm 和 10~20 cm 时 $n=3$,当土层为 0~20 cm 时, $n=6$ 。

1.5 数据分析

采用 SPSS 19.0 分析数据,采用 LSD 法对容重的均值、标准差和变异系数进行单因素方差分析, $P<0.05$ 代表存在显著性差异。采用单变量分

析法确定影响泡沫砂与土壤混合均匀性的主要因素, $P<0.05$ 表明影响显著。采用 Excel 2013 绘图。

2 结果与讨论

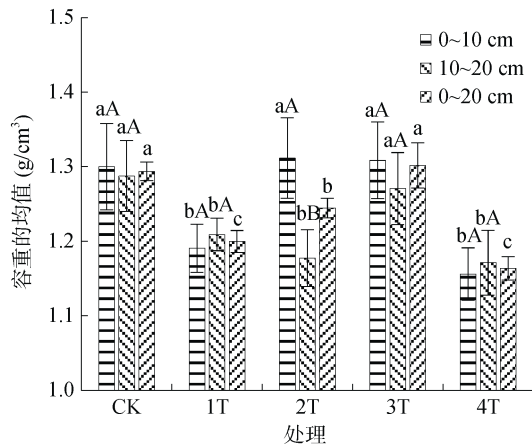
2.1 泡沫砂形态对混合均匀性的影响

常规混合方式下,3 种泡沫砂形态(风干态、水浸态和泥浆态泡沫砂)对泡沫砂与土壤混合后容重的均值、标准差和变异系数的影响分别见图 1、表 2 和图 2 中的 CK、1T 和 2T 处理。泡沫砂形态对不同土层混合均匀性有显著影响。与风干态泡沫砂相比,水浸态泡沫砂显著降低了 0~10 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数,分别比风干态泡沫砂降低 8.43%、188% 和 62.1%;泥浆态泡沫砂对 0~10 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数无显著影响,但泥浆态泡沫砂显著降低了 10~20 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数,分别比风干态泡沫砂降低了 8.53%、30.2% 和 19.0%。采用水浸态泡沫砂与土壤混合显著提升了 0~10 cm 土层泡沫砂与土壤混合的均匀性,而泥浆态泡沫砂则提升了 10~20 cm 土层泡沫砂与土壤混合的均匀性。

泡沫砂形态对泡沫砂和土壤混合物内部的均匀性有显著影响。风干态泡沫砂和水浸态泡沫砂两处理,各处理混合物内部 0~10 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数与 10~20 cm 土层无显著性差异。而泥浆态泡沫砂处理,混合物内部 0~10 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数与 10~20 cm 土层存在显著性差异。泥浆态泡沫砂处理,0~10 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数分别比 0~20 cm 显著增加了 11.4%、68.1% 和 50.8%。采用泥浆态泡沫砂与土壤混合显著降低了混合物内部的均匀性。

泡沫砂形态对泡沫砂和土壤混合物整体均匀性有显著影响。与风干态泡沫砂相比,水浸态泡沫砂显著降低了容重的标准差和变异系数,而泥浆态泡沫砂则显著增加了容重的标准差和变异系数。水浸态泡沫砂显著降低了 0~20 cm 土层容重的均值、标准差和变异系数,分别比风干态泡沫砂降低了 6.98%、53.9% 和 50.2%。虽然采用泥浆态泡沫砂与土壤混合容重的均值比风干态泡沫砂降低了 3.88%,但容重的标准差和变异系数比风干态泡沫砂分别增加了 52.6% 和 58.5%。水浸态泡沫砂显

著提升了泡沫砂与土壤混合物料整体的均匀性。



(图中不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著($P < 0.05$), 下同)
图 1 不同处理 0~10、10~20 cm 和 0~20 cm 土层容重的均值

Fig.1 Average of soil bulk densities of layers in 0-10,10-20 and 0-20 cm under different treatments

表 2 不同处理容重的标准差

Table 2 Standard deviations of bulk densities under different treatments

处理	土壤深度(cm)		
	0~10	10~20	0~20
CK	0.045 9 aA	0.037 1 aA	0.051 3 b
1T	0.015 9 bA	0.021 2 aA	0.023 7 c
2T	0.047 9 aA	0.028 5 aB	0.078 3 a
3T	0.044 1 aA	0.030 5 aA	0.043 8 bc
4T	0.033 9 bA	0.032 3 aA	0.036 0 bc

注:表中同列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著; 同行数据后不同大写字母表示同一处理不同土层间差异在 $P < 0.05$ 水平显著; 下同。

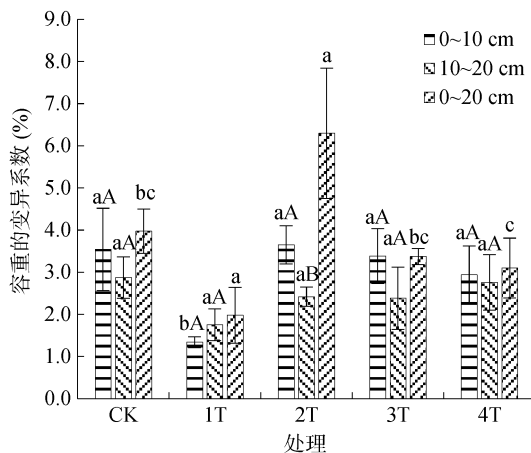


图 2 不同处理土壤容重的变异系数

Fig. 2 Variation coefficients of soil bulk densities under different treatments

水浸态泡沫砂显著降低了土壤容重。这可能与土壤的黏结性和流动性有关。风干态泡沫砂在混合时,细小的土壤颗粒会进入到泡沫砂中,减少了泡沫砂中的孔隙。相比风干态泡沫砂,水浸态泡沫砂由于经过浸水处理,一方面增加了自身的重量,另一方面可以将土壤颗粒吸附在泡沫砂周围,通过团聚形成以泡沫砂为核心的大团粒^[27-29,31],减少了土壤颗粒进入泡沫砂中。泥浆态泡沫砂,由于泥浆中水分含量高,增加了土壤的流动性^[32-33],在泡沫砂包裹泥浆的过程中泥浆便会进入泡沫砂中,占据一部分孔隙。因此,与泥浆态泡沫砂相比,水浸态泡沫砂最大程度地保持了泡沫砂中的大孔隙,降低了土壤容重。水浸态泡沫砂在混合过程中形成的大团粒相当于增加了泡沫砂的密度,进而降低了与土壤容重之间的差异,提升了混合均匀性^[17]。

2.2 混合方式对混合均匀性的影响

为了研究混合方式对泡沫砂与土壤混合均匀性的影响,选择了风干态泡沫砂和水浸态泡沫砂,分析了分层混合对泡沫砂与土壤混合容重的均值、容重的标准差和变异系数的影响,分别见图 1、表 2 和图 2 的 3T 和 4T 处理。分层混合对泡沫砂与土壤混合均匀性的影响与泡沫砂形态有关。对于风干态泡沫砂,分层混合提升了泡沫砂与土壤混合的均匀性。分层混合 0~10、10~20 cm 和 0~20 cm 土层容重的均值与常规混合相差很小,0~10 cm 和 0~20 cm 土层分别比常规混合增加 0.01 g/cm^3 ,而 10~20 cm 土层比常规混合降低了 0.02 g/cm^3 。分层混合 0~10、10~20 cm 和 0~20 cm 土层容重的标准差分别比常规混合降低了 4.08%、21.6% 和 17.1%,容重的变异系数分别降低了 4.73%、21.0% 和 17.8%。分层混合 0~10 cm 和 10~20 cm 变异系数相差 0.13%,小于常规混合(0.77%),分层混合使 0~10 cm 和 10~20 cm 更加均匀。

分层混合降低了水浸态泡沫砂与土壤混合的均匀性。采用水浸态泡沫砂与土壤混合,虽然分层混合 0~10、10~20 cm 土层容重分别比常规混合降低了 3.45% 和 2.59%,但容重的标准差和变异系数大幅增加,容重的标准差分别比常规混合增加了 113% 和 52.4%,容重的变异系数分别增加了 119% 和 57.7%。分层混合虽然降低了 0~10 cm 和 10~20 cm 之间容重的标准差和变异系数差异,但分层混合同时降低了水浸态泡沫砂与土壤混合

的整体均匀性, 0~20 cm 土层容重的标准差和变异系数, 分别比常规混合增加了 51.9%和 56.6%。

虽然混合方式对混合均匀性无显著影响, 但分层混合方式降低了水浸态泡沫砂容重和土壤混合的均匀性(图 1、表 2 和图 2)。可能是因为分层混合降低了物料之间的挤压力。分层混合方式每个批次混合物为常规混合的 1/10, 因此底部物料受到的压力小于常规混合。在压力作用下, 泡沫砂和周围的土壤颗粒形成的大团粒被压实, 团粒的密度增加, 容重也增加(图 1), 同时大团粒粒径下降, 但却提高了混合均匀性^[34]。因此相比常规混合, 分层混合反而降低了湿态泡沫砂混合均匀性。

2.3 混合方式与泡沫砂形态交互效应对混合均匀性的影响

为了分析影响泡沫砂和土壤混合均匀性的主要因素, 采用单变量法分析了混合方式与泡沫砂形态交互效应对混合均匀性的影响(表 3)。混合方式对混合均匀性无显著影响。混合方式对 0~10、10~20 cm 和 0~20 cm 土层容重均值、标准差和变异系数的 F 值在 0.17~2.24, $P>0.05$ 。

泡沫砂形态对泡沫砂与土壤混合的均匀性有显著影响。泡沫砂形态对 0~10 cm 和 0~20 cm

混合均匀性影响显著, 0~10 cm 土层容重均值、标准差和变异系数的 F 值分别为 54.80、11.50 和 5.25, 0~20 cm 土层容重均值、标准差和变异系数的 F 值分别为 38.17、11.30、11.86, 10~20 cm 土层容重均值、标准差和变异系数的 F 值分别为 21.96、1.68 和 0.83。混合方式和泡沫砂形态交互效应对泡沫砂和土壤混合的均匀性无显著影响, 0~10、10~20 cm 和 0~20 cm 土层容重均值、标准差、变异系数的 F 值在 0.31~3.32, $P>0.05$ 。因此, 泡沫砂形态是影响泡沫砂和土壤混合均匀性的主要因素。

混合方式对泡沫砂和土壤混合的均匀性无显著影响, 而泡沫砂形态对混合均匀性有显著影响, 并且两个因素之间无交互效应。这可能与物料物理特性的变化有关。物料物理特性是影响混合均匀度的因素之一, 包括粒度、容重、颗粒表面粗糙度、流动特性和水分含量等。混合物料的物理特性越接近, 其分离度越低, 越容易被混合, 混合效果越好^[35]。在本研究中, 将泡沫砂浸水处理和裹泥浆处理增加了泡沫砂含水量和重量, 间接改变了泡沫砂的物理特性, 而分层混合只是改变了单次混合的量和混合过程中物料受到的挤压力, 并未改变泡沫砂的物理特性。

表 3 混合方式与泡沫砂形态交互效应对混合均匀性的影响

Table 3 Influence of mixing methods and forms of PLC interaction on mixing uniformity

土层(cm)	容重指标	混合方式		泡沫砂形态		混合方式×泡沫砂形态	
		F	P	F	P	F	P
0~10	均值	0.54	>0.05	54.80	<0.001	1.48	>0.05
	标准差	1.87	>0.05	11.50	<0.01	2.79	>0.05
	变异系数	2.24	>0.05	5.25	<0.05	3.32	>0.05
10~20	均值	2.06	>0.05	21.96	<0.01	0.31	>0.05
	标准差	0.17	>0.05	1.68	>0.05	2.60	>0.05
	变异系数	0.39	>0.05	0.83	>0.05	3.29	>0.05
0~20	均值	1.30	>0.05	38.17	<0.001	2.71	>0.05
	标准差	1.00	>0.05	11.30	<0.01	1.45	>0.05
	变异系数	0.19	>0.05	11.86	<0.01	2.02	>0.05

3 结论

为提高基质中容重差异大的两种物料——泡沫砂和土壤混合的均匀性, 研究了 5 种混合方法对泡沫砂和土壤混合均匀性的影响, 结果表明, 泡沫砂形态对混合均匀性影响显著。常规混合条件下, 水浸态泡沫砂 0~10、10~20 cm 和 0~20 cm 土

层容重分别比风干态泡沫砂降低 8.43%、6.09% 和 6.98%, 容重的标准差降低了 188%、30.2% 和 53.9%, 容重的变异系数降低了 62.1%、42.9% 和 50.1%。混合方式对混合均匀性无显著影响, 但分层混合降低了水浸态泡沫砂与土壤混合的均匀性, 分层混合条件下, 0~10、10~20 cm 和 0~20 cm 土层容重的标准差比常规混合增加 113%、119%

和 51.9%，容重的变异系数比常规混合增加 52.4%、57.7% 和 56.6%。因此，混合方式选择常规混合，泡沫砂形态选择水浸态时，泡沫砂和土壤混合均匀性最好。

参考文献：

- [1] Acuna R A, Bonachela S, Magan J, et al. Reuse of rockwool slabs and perlite grow-bags in a low-cost greenhouse: Substrates' physical properties and crop production[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 160: 139–147.
- [2] 邹春娇, 张勇勇, 张一鸣, 等. 生物炭对设施连作黄瓜根域基质酶活性和微生物的调节[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1772–1778.
- [3] 张晶, 罗佳, 马艳. 发酵床垫料栽培基质重复利用对辣椒生长和基质性状的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1108–1114.
- [4] 胡俊生, 夏红梅, 辜松, 等. 种苗栽培基质在线混合装置设计与试验[J]. *农机化研究*, 2018, 40(7): 180–184.
- [5] 张硕, 余宏军, 蒋卫杰. 发酵玉米芯或甘蔗渣基质的黄瓜育苗效果[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 236–242.
- [6] Eksi M, Rowe D B, Fernández-Cañero R, et al. Effect of substrate compost percentage on green roof vegetable production[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2): 315–322.
- [7] 郜永博, 马晟, 杨凤娟, 等. 沙子、炉渣、菇渣不同配比对茄子产量和品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2018(10): 50–54.
- [8] Arthur E, Schjonning P, Moldrup P, et al. Soil structure and microbial activity dynamics in 20-month field-incubated organic-amended soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(2): 218–230.
- [9] Jien S, Wang C. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil[J]. *Catena*, 2013, 110: 225–233.
- [10] Lim T J, Spokas K A, Feyereisen G, et al. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 136–144.
- [11] 潘金华, 庄舜尧, 史学正, 等. 土壤结构改良剂对皖南旱地红壤水分特征的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 40–45.
- [12] 李瑛云, 高金辉, 张厚良, 等. 混合基质对苗圃土壤理化性状的影响[J]. *林业勘查设计*, 2013(2): 73–76.
- [13] 任志雨, 范夕玲. 不同体积椰糠与珍珠岩混合基质对甜瓜幼苗生长的影响[J]. *北方园艺*, 2017(19): 51–55.
- [14] Florian-Algarin M, Méndez R. Effect of material properties and design parameters on the final blend uniformity using experimental and simulation results[J]. *Powder Technology*, 2015, 276: 156–165.
- [15] Zhan M S, Sun G G, Lu Y B, et al. Characterization of mixing of binary particles in a continuous colliding static mixer[J]. *Powder Technology*, 2016, 291: 448–455.
- [16] 苏丽娜, 贾晓敏, 谢冰. 集料组成对沥青混合料均匀性影响的试验分析及数值模拟[J]. *科技通报*, 2017, 33(11): 116–120.
- [17] 钱达兴, 马福定, 王彦博. 原料颗粒级配对玻璃配合料混合均匀性的影响[J]. *玻璃与搪瓷*, 1999, 27(2): 39.
- [18] 庾正伟, 刘海, 郭振, 等. 形状和密度差异大的两组元颗粒混合工艺研究[J]. *粉末冶金工业*, 2017, 27(1): 12–15.
- [19] 许东来, 李宁, 田英良, 等. 体积密度相差悬殊的保温材料间混合装置的开发[J]. *机械制造与自动化*, 2011, 40(1): 55–57.
- [20] Li N, Ma B, Wang Y C, et al. Influence analyses of mixing approaches on properties of conventional and interlocking-dense concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 122: 465–472.
- [21] 黄化刚, 班国军, 陈垚, 等. 多孔改良剂对毕节烟区土壤性状及烤烟产质量的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1427–1437.
- [22] 张均华, 林育炯, 黄洁, 等. 基质类型及烯效唑对不同秧龄晚稻机插质量和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 44–52.
- [23] Ammarcha C, Gatamel C, Dirion J, et al. Continuous powder mixing of segregating mixtures under steady and unsteady state regimes: Homogeneity assessment by real-time on-line image analysis[J]. *Powder Technology*, 2017, 315: 39–52.
- [24] 王燕, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 等. 基于多重分形的半干旱区农田表层土壤粒径分布特征研究[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 826–831.
- [25] 于冬雪, 贾小旭, 黄来明, 等. 黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 55–64.
- [26] 尹邦跃, 梁雪元, 梁启东. 模拟 MOX 燃料粉末混合均匀性研究[J]. *原子能科学技术*, 2005, 39(S1): 125–130.
- [27] 范如芹, 罗佳, 张振华. 复合调理剂对栽培基质性能及蔬菜生长的影响[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(4): 887–896.
- [28] 邓超, 毕利东, 秦江涛, 等. 长期施肥下土壤性质变化及其对微生物生物量的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 888–893.
- [29] 焦梦妍, 从怀军, 姚静, 等. 自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重变化及其蓄水性能效应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 128–133.
- [30] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [31] 李海伟. 散状物料流动性性能试验方法的研究及 EDEM 仿真[D]. 太原: 太原科技大学, 2016.
- [32] 解立斌, 霍军生, 黄建. 食品粉体混合: 混合机理与混合均匀度影响因素探讨[J]. *中国食品添加剂*, 2011(4): 63–67.
- [33] 任露泉, 陈德兴, 陈秉聪. 土壤粘附研究概述[J]. *农业工程学报*, 1990, 6(1): 1–7.
- [34] 王树传, 高文元, 屈有元. 含水量和粒度对粉粒状物料流动性的影响[J]. *大连轻工业学院学报*, 1996, 15(2): 29–32.
- [35] 章文明, 高俊, 董延. 影响饲料混合均匀度的因素及其在中国的现状[J]. *饲料与畜牧*, 2015(4): 59–63.