

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.025

孙益权, 王美艳, 张龙, 等. “泡沫砂”改良黏重黄壤孔隙结构的粒径效应. 土壤, 2020, 52(3): 597–602.

“泡沫砂”改良黏重黄壤孔隙结构的粒径效应^①

孙益权^{1,3}, 王美艳^{1*}, 张龙², 陈雪², 张忠启³, 史学正¹, 徐胜祥¹, 孙维侠¹, 班国军², 夏中文²

(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 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州毕节 551700; 3 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏徐州 221116)

摘要:以贵州毕节黏重的黄壤为研究对象,通过掺入等量不同粒径的泡沫砂进行温室模拟试验,泡沫砂粒径分别为 0.5~2 mm(1T)、2~7 mm(2T)和 7~10 mm(3T),研究孔隙特征改良的粒径效应。研究表明:与 CK 相比,添加 3 种粒径泡沫砂的处理均增加了土壤的通气孔隙,但在同等添加比例下,随着泡沫砂粒径的增大,土壤通气孔隙度也随之增加,1T、2T 和 3T 处理相较于 CK 处理分别增加了 4.68%、7.39% 和 14.5%;不同粒径泡沫砂对不同当量孔径的孔隙影响不同,1T、2T 和 3T 处理分别显著提升了当量孔径 200~500、1 000~2 000、>2 000 μm 的孔隙;不同处理均很好地提升了土壤孔隙连通度,但不同处理之间无显著差异。2T 处理在改良土壤总孔隙和容重方面,与 3T 处理一同并为较优处理;在改良土壤通气孔隙度方面,2T 处理的土壤通气孔隙度达到农业生产上最适宜区间,为最优处理;在改良分级孔隙配比方面,2T 处理为次优处理。因此,从土壤通气孔隙、土壤分级孔隙和土壤孔隙形态等多角度考虑,2~7 mm 粒径泡沫砂可作为黏重土壤改良的最佳材料。

关键词: 泡沫砂; 黄壤; 粒径效应; 孔隙结构

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A

Particle Size Effects of “Foam Sand” on Improving Pore Structure of Clayey Yellow Soil

SUN Yiquan^{1,3}, WANG Meiyang^{1*}, ZHANG Long², CHEN Xue², ZHANG Zhongqi³, SHI Xuezheng¹, XU Shengxiang¹, SUN Weixia¹, BAN Guojun², XIA Zhongwen²

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Bijie Branch Company, Guizhou Tobacco Company, Bijie, Guizhou 551700, China; 3 School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Yellow soil in Bijie of Guizhou was taken as the research object, and simulation test in the greenhouse was carried out to study the effect of foam sand on pore structure by incorporating equal amount of foam sands with different diameters, which include 0.5–2 mm (1T treatment), 2–7 mm (2T treatment) and 7–10 mm (3T treatment). The results showed that soil aeration porosity increased with the increase of diameter of the foam sand under the same ratio of addition, compared with CK (without foam sand), 1T, 2T and 3T treatments increased soil aeration porosity by 4.68%, 7.39% and 14.5%, respectively. Foam sands with different diameters had different effects on pores with different equivalent diameters, 1T, 2T, and 3T treatments increased porosities with 200–500 μm , 1 000–2 000 μm and >2 000 μm in diameters, respectively. Foam sands improved pore connectivity compared with CK, but no significant difference was found among 1T, 2T and 3T treatments. 2T and 3T treatments improved soil bulk density and total porosity most, and 2T treatment improved the proportion of soil aeration porosity the second most. Therefore, from the perspectives of aeration pores, soil porosity proportions and pore morphology, foam sand with 2–7 mm diameter is best in improving clayey yellow soil.

Key words: Foam sand; Yellow soil; Particle size effect; Pore structure

①基金项目: 贵州省烟草公司毕节市公司科技专项(毕节合 2015-02, 省市院合 2015-06)和中国烟草总公司贵州省公司科技项目(合同号 201703)资助。

* 通讯作者(mywang@issas.ac.cn)

作者简介: 孙益权(1992—), 男, 江苏丰县人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源与环境方面的研究。E-mail: sunyiquan305@163.com

黄壤是贵州植烟土壤中分布最广的土壤类型^[1],其质地黏重,多为黏壤土和黏土,具有保水性好、通透性差等特点^[2-3]。一方面,黄壤中黏粒含量高、砂粒含量低,土粒间隙较小,多为毛细孔隙,不利于水分的排出^[4];另一方面,常年连作、过度施用化肥等高强度人为作用,导致土壤孔隙结构进一步变差^[5],土壤通气孔隙锐减,抑制土壤好气微生物的活动,降低土壤有机质的分解,不利于作物的生长^[6-7]。因此,改善烟区土壤孔隙结构、增加土壤孔隙对于当前烟叶生产具有重要意义。

当前针对土壤孔隙结构差、孔隙不足等问题,国内外已经开展了较多的工作,添加土壤结构改良剂是改善土壤结构、增加土壤孔隙的重要方法。土壤结构改良剂类型可分为天然改良剂和人工改良剂^[8],天然改良剂主要包括沙子、沸石、蛭石、珍珠岩、粉煤灰等^[9-12];人工改良剂主要包括聚乙烯醇、聚丙烯酰胺、脲醛树脂等^[13-15]。蔺亚莉等^[9]在内蒙古河套平原进行了黏性碱化盐土中掺入不同比例沙子试验,研究表明,黏性碱化盐土中掺入 20% 沙子后,其土壤容重下降 0.15 g/cm³,土壤通气孔隙度增加了 9.60%。Ghodrat 等^[12]在美国大西洋平原进行砂壤土中添加不同比例的粉煤灰试验,结果表明,添加 30% 粉煤灰处理的土壤含水量从 12% 增加到 25%。王玺洋等^[13]在福建茶园中进行了添加不同量聚丙烯酰胺试验,研究表明,适量的聚丙烯酰胺可以有效降低土壤容重,过量的聚丙烯酰胺则会阻碍水分渗透,增加土壤容重。万建伟等^[14]在室内模拟试验中,施用 0.2% 的聚乙烯醇可使黏壤土水稳性团聚体从 25% 左右提高到 90% 以上。

合理施用土壤结构改良剂可有效增加土壤孔隙度,改善土壤结构,施用土壤结构改良剂过量或不足时,则改良效果有限,甚至有可能起反作用。对于聚丙烯酰胺等化学改良剂,使用时仅需要考虑土壤中改良剂的添加比例对土壤结构的影响;而对于无机固体改良剂,不仅需要研究土壤改良剂比例对土壤结构的影响,改良剂粒径是否会影响土壤孔隙结构也很重要,而相关研究较少。鉴于此,中国科学院南京土壤研究所研发了一种具有内部孔隙结构发达、生产成本低和环境友好等特点的新型多孔材料——泡沫砂,并以贵州毕节烟区黄壤为研究对象,通过添加不同粒径的泡沫砂,研究泡沫砂粒径对供试土壤孔隙结构和孔隙度的影响,探讨泡沫砂粒径与土壤孔隙结构之间的量化关系,为毕节烟区黄壤改良提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验土壤取自贵州省毕节市金沙烟草科技园,土壤类型为黄壤。试验土壤风干后过 5 mm 筛作为盆栽用土,其 pH 为 6.4,有机质含量为 19.5 g/kg,有效磷含量为 42.0 mg/kg,速效钾含量为 450 mg/kg,有效硫含量为 83.6 mg/kg,氯离子含量为 21.3 mg/kg,土壤黏粒(<0.002 mm)含量为 475.6 g/kg,粉粒(0.05 ~ 0.002 mm)含量为 349.8 g/kg,砂粒(>0.05 mm)含量为 174.6 g/kg,土壤质地为黏土。

泡沫砂是通过特殊工艺制成的一种新型无机矿物材料,呈蜂窝状,具有孔隙发达、容重小、通气性能良好等优点。其 pH 为 9.2,松散容重(2 ~ 7 mm)为 0.26 g/cm³。

1.2 试验设计

泡沫砂施入土壤后变化微小,是一种长效的土壤结构改良材料。综合 Qu 和 Zhao^[16]、潘金华等^[17]及 Angin 等^[18]对土壤结构改良剂粒径的设置,并结合泡沫砂的特点,本研究设置了 CK、1T(0.5 ~ 2 mm)、2T(2 ~ 7 mm)和 3T(7 ~ 10 mm)共 4 个处理(表 1),每个处理 3 次重复。按照表 1 的设计要求,将土壤与不同粒径的泡沫砂混合均匀装填至试验盆中,装盆容积为 9.5 L。土壤容重按 1.3 g/cm³ 计。由于不同粒径泡沫砂容重相差不大,为统一计算,泡沫砂容重均按 0.26 g/cm³ 计。装填结束后,对每个处理进行多次浇水,以底部出水为标准,待土体无明显下沉时确定为平衡状态。土体稳定后种植小青菜,每盆种植 6 株。第一茬小青菜收割后,对表层土壤进行翻耕,然后种植第二茬小青菜,种植方式与第一茬相同。盆栽试验于 2016 年 11 月开始至 2017 年 5 月结束,试验总时长为 6 个月。

表 1 土壤改良试验处理
Table 1 Treatments of soil amelioration experiment

处理	改良剂粒径(mm)	土壤体积比例(%)	改良剂体积比例(%)
CK	-	100	-
1T	0.5 ~ 2	90	10
2T	2 ~ 7	90	10
3T	7 ~ 10	90	10

1.3 样品采集

试验结束后,用 PVC 管(直径 50 mm,高度 50 mm)取样,采样深度为 3 ~ 8 cm,共 12 个 PVC 管样品用于 CT 扫描。另,每盆取环刀样品(直径 50.46 mm,高度 50 mm)2 个,采样深度为 3 ~ 8 cm,共 24 个环

刀样品，分别用于测定土壤容重和总孔隙度。

1.4 样品测定

1) 土壤容重和总孔隙度的测定与计算。土壤容重和总孔隙度的计算如式(1)和式(2)所示：

$$D = M / V \quad (1)$$

$$P(\%) = (d - D) / d \times 100 \quad (2)$$

式中： D 为土壤容重； M 为干土壤质量； V 为环刀体积； P 为土壤孔隙度； d 为土壤密度(取平均土壤密度 2.65 g/cm^3)。

2) 土壤孔隙结构的扫描与分析。本研究通过 CT 扫描技术测量 PVC 原状土柱结构，获取原状土柱扫描图像，基于扫描图像的处理与分析获得土壤孔隙结构数据。土壤样品扫描的空间分辨率为 $25 \mu\text{m} \times$

$25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ ，扫描所得孔隙当量孔径 $> 50 \mu\text{m}$ 。扫描后的图像利用 ImageJ 软件进行处理和分析^[19]。

试验采用全局阈值法对灰度图像做分割处理以获取孔隙和固体颗粒以及土壤基质的黑白二值图像(图 1)。选取 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的兴趣区，将切割图像存储为 8 位(256 级)的灰度图像。将孔隙当量孔径 $> 50 \mu\text{m}$ 的孔隙面积占图像总面积的比例作为通气孔隙度^[20]，并将通气孔隙按当量孔径(直径)分级，分别为 $50 \sim 100$ 、 $100 \sim 200$ 、 $200 \sim 500$ 、 $500 \sim 1000$ 、 $1000 \sim 2000$ 和 $> 2000 \mu\text{m}$ ^[21]。另外，通过 BoneJ 插件计算孔隙的连通度，用于表示孔隙的连通性；计算孔隙的分形维数来表示孔隙结构的复杂程度^[22]。

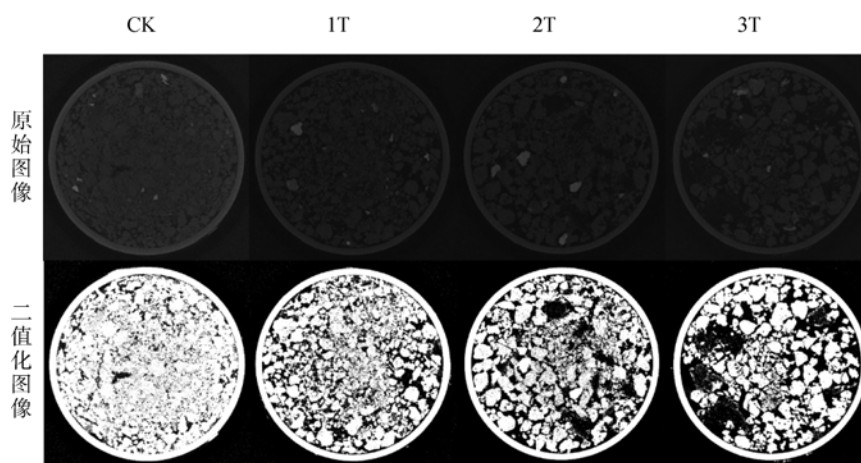


图 1 灰度图像的二值化处理
Fig.1 Binaryzation processing of gray images

2 结果与讨论

2.1 泡沫砂粒径对土壤容重和总孔隙度的影响

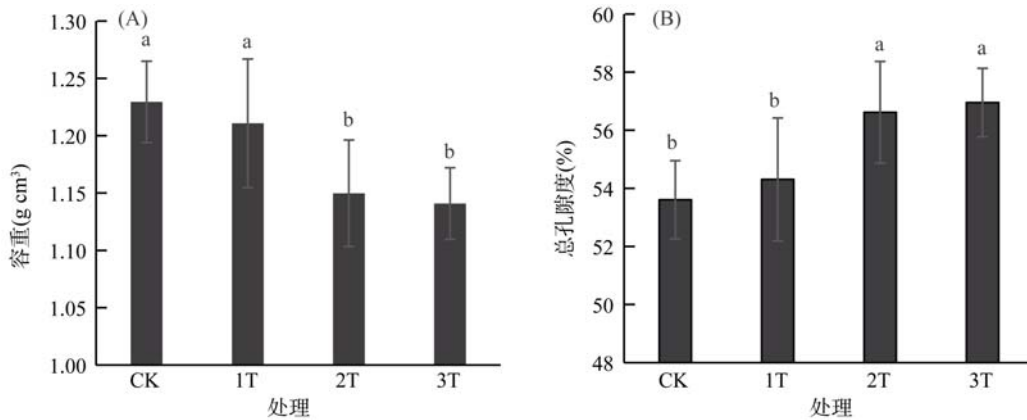
4 个处理的表层土壤容重和总孔隙度如图 2 所示。与 CK 处理相比，添加泡沫砂的 3 个处理土壤容重随泡沫砂粒径的增加而降低，土壤总孔隙度随着泡沫砂粒径的增加而增加。1T、2T 和 3T 处理的土壤容重分别下降了 1.51%、6.48% 和 7.21%，土壤总孔隙度分别增加 0.70%、3.01% 和 3.35%。试验表明，当泡沫砂添加比重相同时，粒径为 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 的泡沫砂对土壤容重和总孔隙度的影响较小；粒径为 $2 \sim 7 \text{ mm}$ 和 $7 \sim 10 \text{ mm}$ 的泡沫砂则能很好地改善土壤容重和总孔隙，2T 和 3T 为较优处理。

2.2 泡沫砂粒径对土壤通气孔隙的影响

烟叶产质量的提升取决于土壤质量的改善^[23]。土壤质量提升的基础是土壤结构的改善^[24]。土壤结构是维持土壤功能的基础，直接影响着土壤的通气、

透水性能^[25]，因此好的土壤结构使得土壤各项功能得以实现，进而提高作物的产量。由于贵州黄壤黏粒含量高，长期连作以及过量使用化肥等原因，通气孔隙严重不足，已经直接影响种植作物的产质量。通过 CT 扫描获取的不同处理的通气孔隙度，如图 3 所示。添加泡沫砂的处理通气孔隙度均显著高于 CK 处理，土壤通气孔隙度随着泡沫砂粒径的增加而增加，不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。CK、1T、2T 和 3T 处理的土壤通气孔隙度分别为 8.2%、12.8%、15.5% 和 22.7%，通气孔隙度最高的 3T 处理则超过 20%，最低的 CK 处理通气孔隙度不足 10%。1T、2T 和 3T 处理相较于 CK 处理分别增加 4.68%、7.39% 和 14.5%，提升幅度分别为 57.5%、90.6% 和 178%，添加泡沫砂处理的土壤通气孔隙度均有较大幅度的提升。

Lipiec 和 Hatano^[26]将 10% 的土壤通气孔隙度定义为作物生长的临界值，小于 10% 则土壤通气能力



(图中不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著,下同)

图 2 不同泡沫砂粒径处理下的土壤容重(A)和总孔隙度(B)

Fig. 2 Soil bulk densities (A) and total porosities (B) under foam sands with different diameters

不足,作物生长受限,为保证作物正常生长,土壤通气孔隙度需要大于 10%;黄昌勇^[4]认为耕层的通气孔隙度最合理的范围是 15% ~ 20%;郝葳等^[27]研究表明,优质烟区的土壤通气孔隙度范围为 15.9% ~ 19.6%。本研究中,未添加泡沫砂的 CK 处理,其通气孔隙度最低,不足 10%,使得 CK 处理的两茬小青菜生物量均低于其他处理;添加泡沫砂后,土壤通气孔隙随着泡沫砂粒径增加而增加,表层土壤变得疏松,有利于作物根系的下扎^[28]。土壤通气孔隙并不是越大越好,合理的通气孔隙度(15% ~ 20%)可有效增加作物产量,通气孔隙过大或过小均不利于作物的生长。2T 处理通气孔隙度为 15.5%,符合作物生长所要求的通气孔隙度最合理的范围,并且最为接近优质烟区对土壤通气孔隙度的要求,其为最优处理。

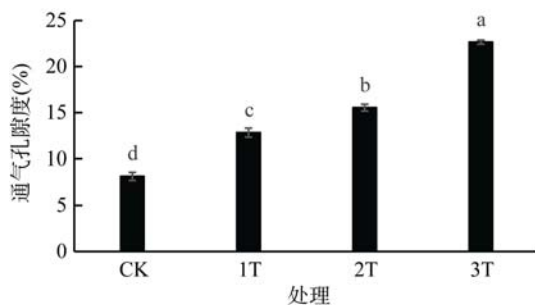


图 3 不同泡沫砂粒径处理下的土壤通气孔隙

Fig. 3 Soil aeration porosity under foam sands with different diameters

2.3 泡沫砂粒径对土壤分级孔隙的影响

土壤孔径分布是表征土壤孔隙的重要指标,这是由于土壤孔径分布对作物生长和土壤过程(易于根渗透、水和气体的储存和运动)有重要影响。Pagliai 和 Nobili^[29]认为当量孔径(直径)50 ~ 500 μm 的土壤孔隙

为传输孔隙,用以为作物生长提供水分和养分,是土壤孔隙中较为重要的孔隙。当量孔径 $> 1\ 000\ \mu\text{m}$ 的土壤孔隙为生物孔隙,多为蚯蚓等天然生物活动所生成^[30],可以快速传输土壤空气、水和养分,但也容易造成水肥流失等。

由表 2 可知,添加泡沫砂对增加当量孔径 $> 200\ \mu\text{m}$ 的孔隙效果显著,其中 1T、2T 和 3T 处理分别对当量孔径 200 ~ 500、1 000 ~ 2 000、 $> 2\ 000\ \mu\text{m}$ 的孔隙提升效果显著。随着当量孔径的增加,CK 处理相应孔径的孔隙度呈现先增加再降低的趋势,而添加泡沫砂处理则呈现上升趋势,上升幅度随着泡沫砂粒径的增加而增加。不同处理之间各级孔径的孔隙度差别不大,仅在 $> 2\ 000\ \mu\text{m}$ 这一级别差异显著,CK、1T、2T 和 3T 处理当量孔径 $> 2\ 000\ \mu\text{m}$ 的孔隙占通气孔隙的比例分别为 7.61%、13.72%、37.64% 和 56.6%。土壤孔隙孔径越大,孔隙度越高,则土壤的氧气和水分的交换越频繁,越有利于土壤的矿化^[31],并为作物的生长提供必要的养分;然而,当土壤孔隙孔径过大,则会加速水肥的流失,无法有效地蓄积水分^[32],使得作物生长受限。CK 处理当量孔径 50 ~ 200 μm 的孔隙稍高于其他处理,其余孔径的孔隙远低于其他处理;3T 处理当量孔径 $> 2\ 000\ \mu\text{m}$ 的孔隙度过大,超过 10%,水肥流失严重;仅 1T 和 2T 处理各级通气孔隙配比合理,因此,从泡沫砂粒径对土壤分级孔隙的影响来看,1T 和 2T 为较优处理。

2.4 沫砂粒径对孔隙形态参数的影响

为了更好地表现不同处理土壤孔隙结构的连通性和复杂性,本文引入连通度和分型维数两个参数,可以进一步解释土壤孔隙的连通性和复杂性,连通度越高则代表连通性越高,分型维数越高则代表复杂程

表 2 不同泡沫砂粒径处理下的土壤分级孔隙
Table 2 Proportion of soil porosities under foam sands with different diameters

处理	不同当量孔隙孔隙度(%)					
	50 ~ 100 μm	100 ~ 200 μm	200 ~ 500 μm	500 ~ 1 000 μm	1 000 ~ 2 000 μm	>2 000 μm
CK	0.70 a	1.34 a	2.15 ab	1.82 b	1.34 b	0.62 c
1T	0.53 b	1.26 ab	2.70 a	3.16 ab	3.30 a	1.76 c
2T	0.45 b	0.99 bc	2.06 ab	2.59 ab	3.50 a	5.85 b
3T	0.44 b	0.92 c	1.92 b	3.60 a	2.85 a	12.82 a

注：表中不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著

度越高^[24]。由表 3 可知，计算分形维数的回归方程的决定系数 R^2 均为 0.999，说明本方法计算分形维数具有统计学意义^[33]。CK 处理的连通度最小，添加泡沫砂的处理的连通度均远大于 CK 处理，其中 1T 和 3T 处理与 CK 之间差异显著，2T 处理与 CK 之间差异不显著。这表明 CK 处理的连通性最差，添加不同粒径的泡沫砂均可以有效改善土壤的连通性，进而有利于土壤水分和气体的流通。不同处理之间分形维数差异较小，且差异不显著，仅 1T 和 2T 处理的分形维数略微有 0.01 下降；3T 与 CK 处理分形维数相同，土壤孔隙结构的稳定性和复杂性没有变化。

添加泡沫砂处理的连通性大于未添加泡沫砂的 CK 处理，而不同泡沫砂处理之间差异不显著。这主要是由于泡沫砂改变了土壤结构，土壤的通气性能与通水性能均得以提高，从而使得土壤中孤立的大孔隙得以连通，产生连接通道，可有效促进土壤中空气、水分和养分的快速流动。良好的孔隙连通性能有利于良好团粒结构的形成，疏松板结土壤，促进作物根系的生长^[34]。三维分形维数反映了物体的自相似性和占有空间的有效性，分形维数越大表明该物体结构越复杂，且其值介于 2 ~ 3^[24]。4 个处理的分形维数没有显著差异，差别较小，表明添加泡沫砂并未对土壤结构的复杂程度和稳定产生影响。

表 3 泡沫砂粒径对孔隙分形维数和连通度的影响
Table 3 Pore fractal dimension and connectivity under foam sands with different diameters

处理	连通度($\times 10^5$)	分形维数	R^2
CK	14.4 b	2.77 a	0.999
1T	22.6 a	2.76 a	0.999
2T	18.9 ab	2.76 a	0.999
3T	21.0 a	2.77 a	0.999

3 结论

泡沫砂能有效提升土壤总孔隙，增加土壤通气孔

隙与土壤孔隙连通度，进而改善土壤结构，达到改良板结土壤的目的。添加泡沫砂粒径越大则土壤大孔径的提升效果越明显，土壤通气孔隙度则越大。2T 和 3T 处理可以很好地改善土壤容重和总孔隙度，且 2T 和 3T 处理之间差异较小；2T 处理的土壤通气孔隙度为 15.5%，达到农业生产上最适宜通气孔隙区间(15% ~ 20%)，并且也最为接近优质烟区土壤通气孔隙范围(15.9% ~ 19.6%)；从土壤分级孔隙来看，1T 处理的各级孔隙配比较为合理，其次为 2T 处理；1T、2T 和 3T 处理对土壤孔隙连通度和分形维数的影响差异均不显著。因此，从增加土壤通气孔隙度和改善土壤孔隙结构等综合考虑，2 ~ 7 mm 孔径的泡沫砂为贵州黏重黄壤改良的最佳粒径范围。

参考文献：

- [1] 秦钟立. 贵州植烟土壤养分特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [2] 蒋太明, 魏朝富, 谢德体, 等. 贵州中部喀斯特地区黄壤持水性能的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 25-29.
- [3] 戴智慧. 贵州坡地黄壤水分时空变异特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [4] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [5] 李坡. 喀斯特地区过度开发土地资源的环境变异[J]. 贵州科学, 1996, 14(3): 27-33.
- [6] 胡青青, 李恋卿, 潘根兴. 生物质炭醋糟复配物代替草炭对辣椒幼苗生长的影响[J]. 土壤, 2017, 49(2): 273-282.
- [7] 雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 297-308.
- [8] 朱咏莉, 刘军, 王益权. 国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J]. 水土保持学报, 2001, 15(S2): 140-142.
- [9] 蔺亚莉, 李跃进, 陈玉海, 等. 碱化盐土掺砂对土壤理化性状和玉米产量影响的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 119-123.
- [10] 邱学礼, 高福宏, 方波, 等. 不同土壤改良措施对植烟土壤理化性状的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(6): 2270-2273

- [11] 徐晓敏, 吴淑芳, 康倍铭, 等. 五种天然土壤改良剂的养分与保水性研究及评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 85–89.
- [12] Ghodrati M, Sims J T, Vasilas B L. Evaluation of fly ash as a soil amendment for the Atlantic Coastal Plain: I. Soil hydraulic properties and elemental leaching[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1995, 81(3–4): 349–361.
- [13] 王玺洋, 黄炎和, 林金石, 等. 南方茶园红壤施用 PAM 对土壤理化性质和茶叶安全的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 785–790.
- [14] 万建伟, 朱永绥, 邵建清, 等. 土壤结构改良剂在盆栽花卉土壤上的应用研究[J]. 园艺学报, 1989, 16(1): 68–72.
- [15] 冯浩, 吴淑芳, 吴普特. 高分子聚合物对土壤物理及坡面产流产沙特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(1): 15–19.
- [16] Qu J L, Zhao D X. Comparative research on tillable properties of diatomite-improved soils in the Yangtze River Delta region, China[J]. Science of The Total Environment, 2016, 568: 480–488.
- [17] 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.
- [18] Angin I, Kose M, Aslantas R. Effect of diatomite on growth of strawberry[J]. Pakistan Journal of Botany. 2011, 43(43): 573–577.
- [19] dal Ferro N, Sartori L, Simonetti G, et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 140(5): 55–65.
- [20] Gląb T. Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144: 8–19.
- [21] Gląb T, Kulig B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*)[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 99(2): 169–178.
- [22] Doube M, Kłosowski M M, Arganda-Carreras I, et al. BoneJ: Free and extensible bone image analysis in ImageJ[J]. Bone, 2010, 47(6): 1076–1079.
- [23] 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.
- [24] 赵冬, 许明祥, 刘国彬, 等. 用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 123–129.
- [25] 尚应妮, 赵世伟, 王子龙, 等. 植被恢复下土壤结构与功能的关系[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 370–375.
- [26] Lipiec J, Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth[J]. Geoderma, 2003, 116(1): 107–136.
- [27] 郝葳, 田孝华. 优质烟区土壤物理性状分析与研究[J]. 烟草科技, 1996, 29(5): 34–35.
- [28] 郑存德. 土壤物理性质对玉米生长影响及高产农田土壤物理特征研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [29] Pagliai M, de Nobili M. Relationships between soil porosity, root development and soil enzyme activity in cultivated soils[J]. Geoderma, 1993, 56: 243–256.
- [30] Ringrosevoase A J, Bullock P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs[J]. European Journal of Soil Science, 1984, 35(4): 673–684.
- [31] 郭全恩, 王益权, 南丽丽, 等. 溶质类型与矿化度对半干旱盐渍化地区果园土壤水分有效性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 973–978.
- [32] 赵亮, 唐泽军. 粉煤灰对沙质土壤物理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 178–181, 202.
- [33] 洪明海, 徐驰, 曾文治, 等. 盐渍土壤孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(7): 54–58.
- [34] 蔡太义, 张佳宝, 张丛志, 等. 基于显微 CT 研究施肥方式对砂姜黑土大孔隙结构的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(12): 143–149.