

土壤结构改良剂对皖南旱地红壤 水分特征的影响

潘金华¹, 庄舜尧¹, 史学正¹, 曹志洪¹, 蔡宪杰², 程森²

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续利用国家重点实验室,
江苏南京 210008; 2. 上海烟草集团有限责任公司, 上海 200082)

摘要: [目的] 研究土壤结构改良剂对皖南旱地红壤孔隙、容重及水分特征的影响, 为皖南旱地红壤改良、提高土壤持水保水与抗旱保墒性能提供依据。[方法] 采用硅藻土(通气性 Si 改良剂)、泡沫沙类改良剂(T_{20})和无机矿石类改良剂(G_{20})等 3 种土壤结构改良剂, 设置 1%、2%、5% 与 10% 的 4 个添加比例, 进行土壤物理性状与水分特征测试。[结果] 硅藻土与 T_{20} 均可显著降低土壤容重, 而 G_{20} 在添加 5% 与 10% 时才显著降低; 硅藻土处理土壤毛管孔隙度由 52.1% 增加到 91.3%, 优于 T_{20} 和 G_{20} ; 硅藻土与 T_{20} 的吸湿系数与凋萎湿度随用量呈先增加而后下降, 而 G_{20} 则随添加量增加而增加; 土壤的饱和持水量与田间持水量均随土壤结构改良剂添加量的增加而增加, 以硅藻土增加最多, T_{20} 次之, G_{20} 最少。随改良剂用量增加, 土壤有效水及难效水均呈增加趋势, 其中, 硅藻土处理的难效水增加量显著高于 T_{20} 与 G_{20} 处理。[结论] 改良皖南旱地土壤水分需要根据改良剂材料的种类与用量来进行合理施加, 必要时可以组合搭配使用, 从而达到最优效果。

关键词: 土壤结构改良剂; 皖南旱地; 土壤容重; 孔隙度; 土壤水分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0040-06

中图分类号: S152.7, S156.6

文献参数: 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): 040-045. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.014

Effects of Soil Amendments on Water Characteristics in Red Soil of Upland in South Anhui Province

PAN Jinhua¹, ZHUANG Shuniao¹, SHI Xuezheng¹, CAO Zhihong¹, CAI Xianjie², CHENG Sen²

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. Shanghai Tobacco Group Limited Company, Shanghai 200082, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to investigate the effects of soil amendments on soil porosity, bulk density and water characteristics of upland at South Anhui Province, in order to provide information for soil improvement, water availability and anti-drought. [Methods] Three different kinds of soil amendments including diatomite(Si), foamed sand(T_{20}) and mineral amendment(G_{20}) were used and 4 addition rates of 1%, 2%, 5% and 10% were adopted in the batch experiment. [Results] The addition of Si and T_{20} reduced soil bulk density significantly, however, the addition of G_{20} showed a significant effect only at the addition rate of 5% and 10%. Soil porosity increased from 52.1% to 91.3% by Si treatment, which was better than T_{20} and G_{20} treatment. Soil moisture absorption coefficient and wilting moisture increased first and then decreased with the application amount of Si and T_{20} . In contrast, soil moisture absorption coefficient and wilting moisture increased linearly with the application amount of G_{20} . Soil saturation water capacity and field water capacity increased with the application amount of three amendments, and the increase trend was largest by application of Si, followed by T_{20} and G_{20} . In addition, soil available water and hard available water increased with soil amendment addition rate. The treatment of Si on hard available water was better than T_{20}

收稿日期: 2015-12-11

修回日期: 2016-07-08

资助项目: 沪皖现代烟草农业高科技示范园科技专项“皖南烟稻优质高效生态安全的土肥综合技术研究与示范”(CF56-ZJ1)

第一作者: 潘金华(1989—), 男(汉族), 安徽省枞阳县人, 硕士, 研究方向为土壤学、自然地理学。E-mail: isscaspjh1989@163.com。

通讯作者: 庄舜尧(1970—), 男(汉族), 浙江省舟山市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: syzhuang@issas.ac.cn。

and G_{20} . [Conclusion] The water characteristics of upland soil of South Anhui Province should be improved according to the type and amount of soil amendment. In order to achieve an ideal effect, the combination of various soil amendments should be taken into account.

Keywords: soil amendment; South Anhui Province upland; soil bulk density; soil porosity; soil water

土壤结构改良剂是在现代化工工业的基础上发展起来的,它与传统的土壤改良剂有着明显的区别。土壤改良剂能够改善土壤理化性状和养分状况,增加土壤微生物的活性与丰度,从而促进作物对水分与养分的吸收利用^[1]。目前常用的改良方法有施石灰、增施有机肥及种植绿肥等,但施石灰易引起土壤板结且会造成土壤钙、镁、钾等元素的失衡^[2],增施有机肥与种植绿肥也有增加成本、见效慢的弊端,且对土壤团聚体与结构状况影响有限^[3-5]。土壤结构改良剂有着丰富的孔隙、团粒结构,同时能够调节土壤的酸碱度^[6]。土壤结构改良剂一般有多种成分混合而成,材料来源渠道多样且成本低廉,主要来源有秸秆类、矿物类等^[7],有着广阔的应用前景。

土壤水分是土壤基本理化性质之一,与土壤的孔隙度、容重及保肥能力紧密相关。土壤持水能力的提升可以提高土壤的抗旱能力,缓解农作物生长期间的旱情^[8-10]。皖南旱地土壤有着易板结且黏性重的特征,由于存在降水集中且季节变化大,蒸发强度大,土壤的持水性与透气性差,土壤的季节性干旱与养分贫瘠限制了皖南旱地烟草、毛竹等经济作物的生长,

阻碍了经济作物的增产增收。由于土壤结构改良剂在皖南旱地还未推广使用,因此,本研究旨在探讨土壤改良剂施入皖南旱地土壤中对土壤容重、孔隙度、各种水分常数及有效性的影响,以期为合理利用土壤改良剂资源及增强皖南旱地土壤持水保水、抗旱保墒性能提供科学的理论支持和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤类型:采自安徽省宣城市宣州区杨柳镇南冲林场,该地属于典型北亚热带湿润性季风气候区。供试土壤为第四纪红黏土发育的铝质湿润淋溶土,土壤偏黏重且通透性差,属于板结、肥力低、土层薄、酸性强且易旱的红壤旱坡地。土壤采样时间为 2014 年 10 月,采样深度为 0—15 cm,去除土壤中的杂质,经自然风干后,过 1 mm 筛备用。供试土壤基本性状见表 1。

改良剂类型:硅藻土(通气性 Si 改良剂)、泡沫沙类土壤改良剂(T_{20})和矿石类土壤改良剂(G_{20})。3 种原料均在实验室制备,其基本性质见表 1。

表 1 供试土壤与 3 种土壤改良剂的基本性质

| 供试土壤与土壤改良剂 | pH 值 | 硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 铵态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 田间持水量/% |
|------------|------|--|--|---|--|---------|
| 宣城红壤 | 4.63 | 54.20 | 1.04 | 15.90 | 1.22 | 29.3 |
| S_i | 7.67 | 4.73 | 5.67 | 3.38 | 0.09 | 83.6 |
| T_{20} | 8.44 | 2.91 | 4.77 | 7.44 | 0.18 | 68.3 |
| G_{20} | 9.48 | 5.58 | 13.8 | 5.23 | 0.33 | 56.7 |

注: T_{20} 为强通气性无机材料; G_{20} 为中通气性保水无机材料; S_i 为通气保水性 SiO_2 材料,颗粒粒径为 2~5 mm。下同。

1.2 试验设计

土壤改良剂对皖南旱地土壤水分特征的影响研究。采用皖南旱地土壤为试验土样,土样过 1 mm 筛,土壤改良剂添加设置 3 种土壤改良剂类型:硅藻土, T_{20} 和 G_{20} ; 4 个不同的添加量:1%, 2%, 5% 与 10%。添加比例按照土壤改良剂与土壤的质量的百分比进行混合,每个处理 3 次重复,加上对照,共 39 个处理。按照不同处理分别测定土壤容重、孔隙度、吸湿系数、凋萎湿度、饱和持水量及田间持水量。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤物理性状的测定 在实验室测定土壤容重、土壤总孔隙度、毛管及非毛管孔隙度。将装满土

样的环刀打开后平放于塑料盆底,缓缓向盆中加水直至恰好淹没环刀上沿,使土样饱和 24 h,在饱和期间保持水位不变,当土壤达到饱和后擦干环刀外围的多余水分,称重为 C_1 ;然后将饱和的环刀土样取出置于支架上排水 24 h,期间用保鲜膜封口,置于阴凉避光处,当重力水排净后,称重为 C_2 ;将排水后的土样置于烘箱中,并在 105 °C 温度下将土样烘干至恒重,称重为 C_3 。环刀的重量记为 $C_{\text{环刀}}$ 。采用李笑吟等^[11]的方法计算土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。

1.3.2 土壤田间持水量的测定 土壤田间持水量的测定采用威尔科克斯法进行^[12],为了在实验室中模拟添加土壤改良剂对田间持水量的影响,将改良剂与土样

混合后在 200 cm³ 环刀中不施加外力的情况下装填。具体试验过程:选择 2 个 200 cm³ 环刀,一个环刀作为上环刀,另一个作为下环刀,分别在上、下环刀中装填入同一处理土样,把上环刀土样放入平底的盆中,缓缓向盆中加水,使水面略低于环刀上沿,在盆中饱和 24 h,并保持盆中水位,将饱和好的环刀土样取出底盖替换为滤纸后与下环刀紧密对接,并使用封口膜与橡皮圈黏结固定,置于支架上排水 8 h 后,称重上环刀质量。计算前后 2 次的质量差,得出土样的饱和持水量与田间持水量。

1.3.3 土壤吸湿系数及凋萎湿度测定 采用饱和 K₂SO₄ 法测定^[13-14],方法如下:称取过 2 mm 孔径的风干土样 10 g 置于已知质量的称量瓶(精确至 0.001 g)中,将盛有土样的称量瓶放入干燥器的有孔瓷板上,勿使称量瓶贴近瓶壁。在干燥器底部盛饱和 K₂SO₄ 溶液(每 1 g 土样放入约 3 ml 饱和 K₂SO₄ 溶液),并将干燥器密封好,抽干干燥器内的空气,放置在温度较稳定处保持恒温在 20 °C。在土壤吸湿后一周左右取出称量瓶立即称重(精确至 0.001 g)然后重新放入干燥器内,每个 2~3 d 按同法称量一次直至恒重,计算时取其最大值 M₁。将达到恒定质量的土样置于烘箱中,在 105 °C 烘至恒重(精确至 0.001 g) M₂,计算前后 2 次的质量差。样品进行 3 份平行测定,取其算术平均值,取 1 位小数,平行测定结果允许误差 < 0.7%。

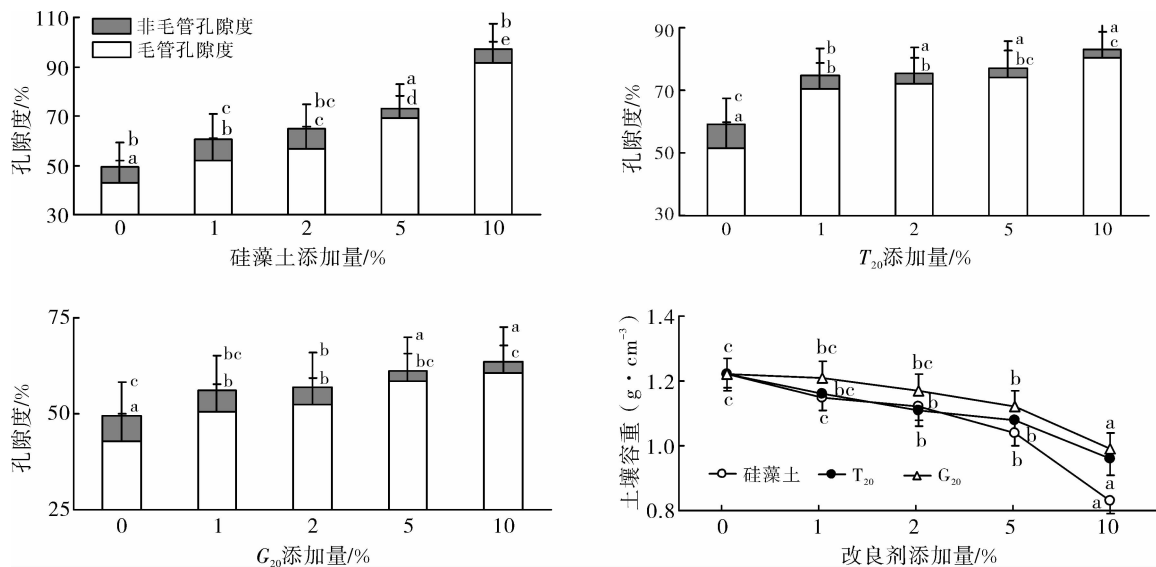
1.4 数据分析

采用 Excel 2013 处理数据和绘图,采用 IBM SPSS Statistics 22.0 进行统计分析,数据间差异采用 LSD 法进行多重比较($\alpha=0.05$),并使用 Duncan 法检验进行单因素显著性分析($p<0.05$);数据以平均值±标准误表示。

2 结果与分析

2.1 土壤结构改良剂对皖南旱地土壤孔隙度与容重的影响

由图 1 可知,3 种土壤改良剂施入土壤后,土壤的毛管孔隙度、总孔隙度均呈上升的趋势;这主要与改良剂的孔隙结构有关。然而,土壤非毛管孔隙度随改良剂添加量的增加呈现出减少的趋势,这可能与各种类型土壤改良剂比表面积和内部结构的差异有关。硅藻土处理土壤毛管孔隙度由 52.1% 增加到 91.3%,而非毛管孔隙度由 8.65% 下降到 5.91%; T₂₀ 处理土壤毛管孔隙度由 58.6% 增加到 61.8%,而非毛管孔隙度由 3.76% 下降到 2.25%; G₂₀ 处理土壤毛管孔隙度由 50.6% 增加到 60.7%,而非毛管孔隙度由 5.48% 下降到 2.79%。土壤容重随改良剂用量的增加而下降。所有硅藻土与 T₂₀ 处理的容重均与对照存在显著差异,而 G₂₀ 在 5% 与 10% 的添加量时才与对照有显著差异。表明土壤容重的下降与土壤结构改良剂的种类和添加量密切相关。



注:不同字母代表差异显著($p<0.05$)。下同。

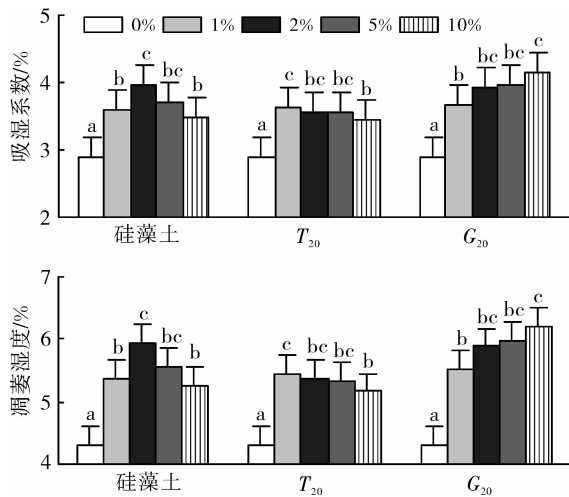
图 1 不同土壤结构改良剂添加对土壤孔隙度、容重的影响

2.2 土壤结构改良剂对皖南旱地土壤吸湿系数与凋萎湿度的影响

如图 2 所示,不同添加量的土壤改良剂显著影响

了土壤吸湿系数、凋萎湿度($p<0.05$);表明土壤结构改良剂对土壤的吸湿系数与凋萎湿度有着显著的改良效果。硅藻土处理随添加量增加,土壤吸湿系数

与凋萎湿度先增加,以2%时最大,而后呈下降的趋势; T_{20} 则在1%时达到最大,而后随添加量增加而减少; G_{20} 处理的土壤吸湿系数与凋萎湿度随添加量增加而增加。由此表明,土壤吸湿系数、凋萎湿度与改良剂类型及用量均有很大的关系。



注:图中0%,1%,2%,5%和10%为土壤结构改良剂的添加量。下同。

图2 土壤结构改良剂添加对土壤吸湿系数、凋萎湿度的影响

2.3 土壤结构改良剂对皖南旱地土壤持水性能的影响

从图3来看,土壤的饱和持水量、田间持水量均随土壤结构改良剂添加量的增加而增加。硅藻土在1%~10%添加量时,饱和持水量较对照增加幅度为12.7%~53.9%,田间持水量较对照增加幅度为13.3%~66.3%; T_{20} 处理的饱和持水量较对照增加幅度为13.9%~27.8%,田间持水量较对照增加幅度为15.5%~37.4%; G_{20} 处理的饱和持水量较对照增加幅度为4.15%~24.5%,田间持水量较对照增加幅度为8.50%~29.5%。表明增加土壤结构改良剂用量能够显著增强土壤的持水性能。

2.4 土壤结构改良剂对皖南旱地水分有效性的影响

土壤有效水分是指介于田间持水量与土壤凋萎湿度之间的水分,这部分属于可被植物吸收和利用的水分。土壤水分有效性主要是指土壤水能否被植物吸收利用以及利用的难易程度^[11]。

由于土壤有效水分含量分为“易效水”、“中效水”和“难效水”:有效水分在80%~100%之间的称为“易效水”;有效水分在60%~80%之间的称为“中效水”;介于凋萎湿度与有效水分60%之间的称为“难效水”^[13]。由图4可以看出,土壤施入改良剂后,土壤的有效水分均随改良剂添加量的增加而呈增加的趋势。硅藻土在1%,2%,5%和10%添加量下的易

效水上限分别达32%,34.6%,38.3%和46.6%; T_{20} 的1%,2%,5%和10%处理的易效水上限可达36.1%~36.4%; G_{20} 的1%,2%,5%和10%处理的易效水上限可达32.2%~35.5%。硅藻土在1%,2%,5%和10%添加量下的中效水上限分别达25.6%~37.3%; T_{20} 的1%,2%,5%和10%处理的中效水上限可达28.9%~29.1%; G_{20} 的1%,2%,5%和10%处理的中效水上限可达25.7%~28.4%,均显著高于对照处理的易、中效水上限。

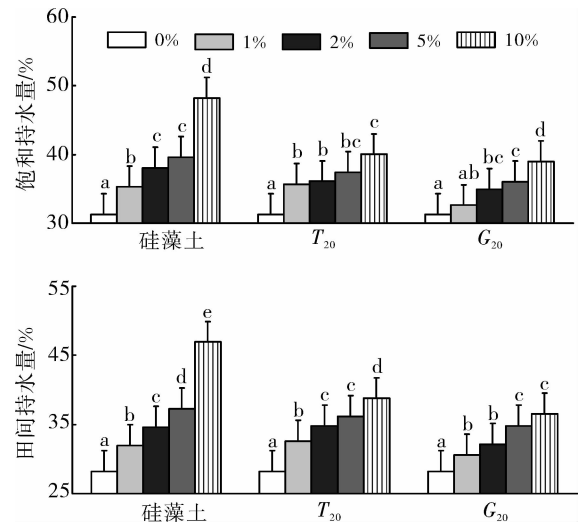


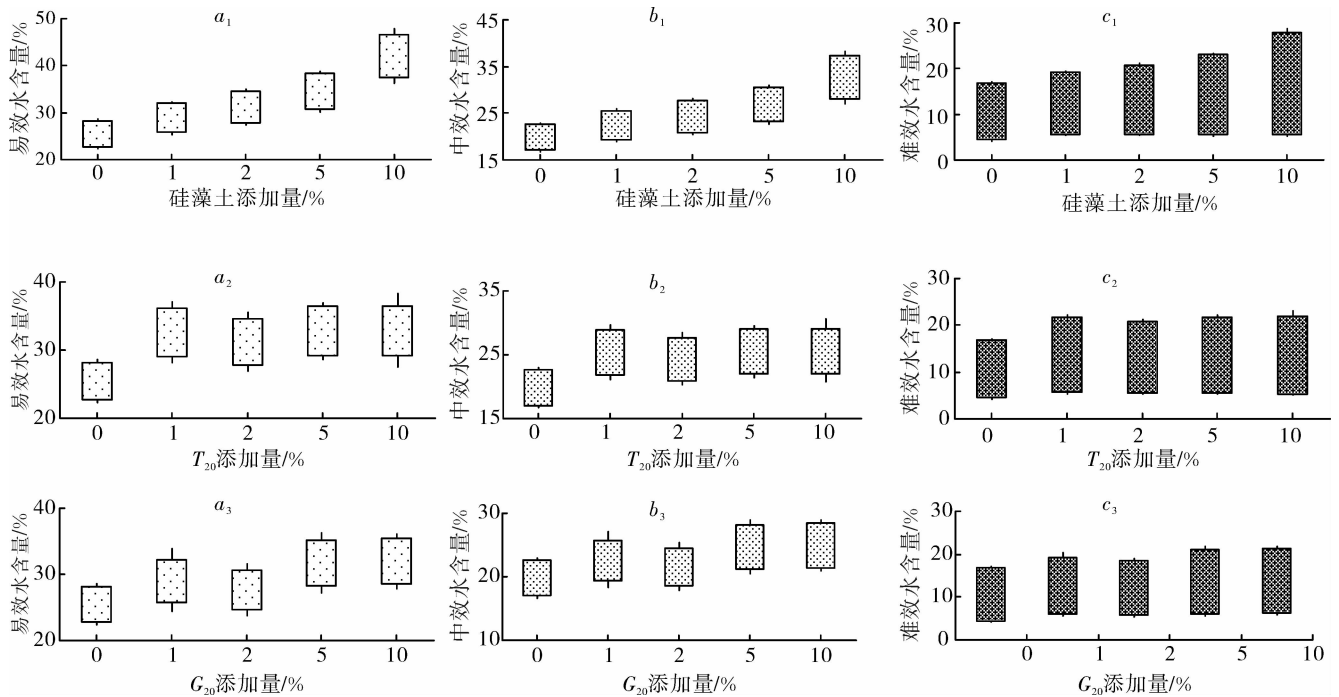
图3 土壤结构改良剂添加对饱和持水量、田间持水量的影响

土壤中的易效水分与中效水分的增加有利于提高土壤对作物的供水能力,易效水与中效水属于作物较易吸收利用的水分级别^[15]。随着改良剂添加量的增加,土壤难效水的含量也随之增加,其中,硅藻土添加处理的难效水随添加量增加而增加,显著高于 T_{20} 与 G_{20} 处理,表明土壤结构改良剂的增加也会增加土壤的难效水,同时,增加的幅度也与改良剂材料种类有关,而增加的难效水不利于植物吸收。

3 讨论与结论

皖南旱地土壤的主要类型为铝质湿润淋溶土,母质发育为皖南第四纪红土,该种土壤存在土壤偏黏重、持水性与通气性差、容重大、孔隙度低。

同时,在作物生长季节受到春旱、夏伏旱、秋旱与降水分布不协调等自然灾害的威胁^[5],皖南地区作为重要的经济作物与林木重要产地,该类土壤的农业用地面积大且生产潜力大^[7],然而这些土壤问题都严重制约皖南旱地作物的生长与产质量的提升。针对皖南旱地土壤的特点,本研究通过施入土壤结构改良剂,以期改良土壤结构,降低土壤容重,增加土壤总孔隙度及毛管孔隙度,调节土壤水分常数,提高土壤持水性能和抗旱保墒的功能。



注:①a₁, b₁, c₁:硅藻土添加对土壤易效水、中效水和难效水的影响;②a₂, b₂, c₂:T₂₀添加对土壤易效水、中效水和难效水的影响;③a₃, b₃, c₃:G₂₀添加对土壤易效水、中效水和难效水的影响。

图 4 土壤结构改良剂添加对土壤水分有效性的影响

本研究发现土壤孔隙度均随土壤结构改良剂施用量的增加而提高,土壤容重均随改良剂施用量的增加而降低,这与有关研究基本一致^[16-22]。解开治等^[7]研究发现通过施入土壤改良剂能够显著降低土壤容重,增强土壤通气、透气和保水性能;员学锋等^[16]通过室内模拟试验发现,施加一定量的土壤改良剂能够有效降低土壤容重,增大土壤的总孔隙度。龙明杰等^[17]研究了淀粉接枝共聚物类型的改良剂,结果发现,当施加 0.2% 比例的该类型改良剂,可使土壤中水稳定性团粒结构含量提高 18.8%~23.72%。改良剂类型是红壤旱地土壤结构改变的因素之一,不同类型改良剂的添加均对土壤物理性状产生显著影响。这与改良剂的孔隙结构有关,主要是由改良剂较低的颗粒密度与多孔隙性质所导致的^[16-22],而改良剂施入土壤后,非毛管孔隙度随着添加量的增加而呈减少的趋势。其中的原因可能是改良剂的添加与土壤相互填充,导致部分较大孔径的非毛管孔隙被占据而减少所致,这与有关研究的结果相近^[22-24]。

通过对土壤水分常数的研究发现:硅藻土与 T₂₀ 处理的吸湿系数与凋萎湿度分别在添加 1% 与 2% 时达到最大,而后呈下降趋势,G₂₀ 处理的土壤吸湿系数与凋萎湿度随添加量增加而增加,这与前人的结果有所不同^[25-27]。颜永毫等^[12]研究表明,土壤田间持水量均随生物质炭使用量的增加而提高,其保水性能又

随之提高;王浩等^[13]通过室内研究认为,土壤水分系数与生物炭的添加量均呈显著正相关,相关性达到 88%~97%;康倍铭等^[18]通过研究发现,施入 PAM 改良剂后土壤持水性较对照提高 23.2%,其有效含水量较对照提高 10.8%。在本研究中,硅藻土处理的土壤饱和和持水量与田间持水量较对照提高 12.7%~53.9% 与 13.3%~66.3%,其有效水的上限提高更明显。不同添加比例的改良剂显著影响了土壤吸湿系数、凋萎湿度、饱和持水量和田间持水量 ($p < 0.05$)。许多研究结果把原因归于土壤的比表面积增大与孔隙度的提高^[7-10,16-22],但也有研究认为可能与土壤盐分有关^[12-14]。由于改良剂中的盐分含量较高,导致土壤中的盐分增加,这些也会加大土壤的吸湿能力,从而增强了土壤对水分的吸持能力^[25]。田间持水量长期以来被看作是灌溉水的上限,也是土壤能够稳定保持的最大水量,也是作物能够利用的有效水上限^[26],而土壤有效水的最大含量(田间持水量与凋萎湿度之差)并不能全面地衡量土壤对作物的供水能力^[27]。试验表明改良剂的添加对于提高土壤持水尤其是有效持水能力有着不错的效果,且在一定程度上增大了易、中效水的范围,但难效水增加程度与前人结果并不一致^[13,21-22]。增加的难效水并不利于作物的吸收利用,针对这一问题仍然需要进一步深入研究。同时,由于土壤改良剂存在着加工的附加成本问

题,从而增加了在田间推广使用的难度,以后的工作也需要从农业生产综合考虑达到合理有效的实施。总之,合理的改良剂应用可以有效改善红壤旱地土壤的供水能力,能更好地满足植物生长的需求,为皖南旱地经济作物的增产增收提供理论依据和改良方案。

[参 考 文 献]

- [1] 吴增芳. 土壤结构改良剂[M]. 北京:科学出版社,1976:24-34.
- [2] 王敬国. 植物营养的土壤化学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1995:92-103.
- [3] 赵记军,徐培智,解开治,等. 土壤改良剂研究现状及其在南方旱坡地的应用前景[J]. 广东农业科学,2007,34(10):38-41.
- [4] 周岩,武继承. 土壤改良剂的研究现状、问题与展望[J]. 河南农业科学,2010,39(8):152-155.
- [5] 潘金华,庄舜尧,史学正,等. 土壤结构改良剂对皖南烤烟生长发育·产量及产值的影响[J]. 安徽农业科学,2015,43(23):68-71,73.
- [6] 蓝佩玲,廖新荣,李淑仪,等. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土上的农用价值与利用原理[J]. 生态环境,2007,16(4):1135-1138.
- [7] 解开治,徐培智,严超,等. 不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究[J]. 中国农学通报,2009,25(20):160-165.
- [8] 董稳军,徐培智,张仁陟,等. 土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(7):810-816.
- [9] 刘慧军,刘景辉,于健,等. 土壤改良剂对燕麦土壤理化性状及微生物量碳的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(5):68-72,77.
- [10] 孙荣国,韦武思,马明,等. 秸秆—膨润土—PAM改良材料对沙质土壤团粒结构的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(2):162-166.
- [11] 李笑吟,毕华兴,张志,等. 晋西黄土区土壤水分有效性分析的克立格法[J]. 土壤学报,2006,43(6):1004-1010.
- [12] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(4):120-124,190.
- [13] 王浩,焦晓燕,王劲松,等. 生物炭对土壤水分特征及胁迫条件下高粱生长的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):253-257,287.
- [14] 高海英,何绪生,耿增超,等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报,2011,27(24):207-213.
- [15] Lehmann J, Czimczik C, Laird D, et al. Stability of biochar in soil[J]. Biochar for Environmental Management: Science and Technology, 2009:183-206.
- [16] 员学锋,汪有科,吴普特,等. PAM对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2):37-40.
- [17] 龙明杰,张宏伟,曾繁荣. 高聚物对土壤结构改良剂的研究 I:淀粉接枝共聚物改良赤红壤的研究[J]. 土壤学报,2001,38(4):584-589.
- [18] 张志毅,汤文娟,熊又升,等. 改良剂对冷浸田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 华中农业大学学报,2015,34(4):37-43.
- [19] 吴海勇,李明德,刘琼峰,等. 不同土壤改良剂在红壤旱地上的应用效果[J]. 湖南农业科学,2010,39(11):45-47,50.
- [20] 康倍铭,徐健,吴淑芳,等. PAM与天然土壤改良材料混合对部分土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究,2014,21(3):68-72,78.
- [21] 王卫华,李建波,张志鹏,等. 覆膜滴灌条件下土壤改良剂对土壤导气率的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(6):160-167.
- [22] 曹丽花,刘合满,赵世伟. 不同改良剂对黄绵土水稳性团聚体的改良效果及其机制[J]. 中国水土保持科学,2011,9(5):37-41.
- [23] 陈先茂,章发根,邓国强,等. 红黄壤土壤结构改良剂应用效果研究[J]. 江西农业学报,2013,25(12):86-88,92.
- [24] 安东,李新平,张永宏,等. 不同土壤改良剂对碱积盐成土改良效果研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(5):115-118.
- [25] 李小刚. 甘肃景电灌区盐化土壤的吸湿系数与凋萎湿度及其预报模型[J]. 土壤学报,2001,38(4):498-505.
- [26] 江培福,雷廷武,刘晓辉,等. 用毛细吸渗原理快速测量土壤田间持水量的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(7):1-5.
- [27] 代海燕,张秋良,魏强,等. 大青山不同植被土壤物理特征及有效水的研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(12):149-153.