

外源添加物对土壤干缩裂缝特征的影响

陈上茂¹, 郭 澎^{1,2}, 邓 博¹, 卫磊嘉¹, 马 泽¹, 陈 丹¹, 毕利东¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014)

摘要: 为研究外源添加物对土壤干缩裂缝特征的影响, 选取水田、旱田、林地 3 种土地利用方式, 添加生石灰(1 g/kg)、黄腐酸(10 g/kg)、鱼塘底泥(250 g/kg)、生物炭(15 g/kg) 4 种外源添加物, 进行土壤干燥收缩试验。结果表明: 除生石灰外, 不同土壤外源添加物处理下各用地类型土壤干燥收缩裂缝特征变化趋势非常一致, 裂缝面密度、长密度、平均宽度均呈现耕作层水田>旱田>林地、犁底层水田>林地>旱田。生石灰对土壤干燥收缩裂缝特征无显著影响; 黄腐酸使土壤干缩裂缝面密度、裂缝平均宽度增加, 但对土壤干缩裂缝长密度无显著影响; 鱼塘底泥使土壤裂缝面密度、长密度增加, 但对干缩裂缝平均宽度无影响; 生物炭使土壤裂缝面密度、裂缝平均宽度降低, 但使裂缝长密度增加。相对于空白对照, 不同外源添加物对于土壤裂缝面密度影响程度表现为耕作层鱼塘底泥>生物炭>黄腐酸>生石灰、犁底层黄腐酸>鱼塘底泥>生物炭>生石灰; 对于裂缝长密度影响程度表现为耕作层生物炭>鱼塘底泥>生石灰>黄腐酸、犁底层生物炭>鱼塘底泥>黄腐酸>生石灰。外源添加物对土壤裂缝特征产生重要影响, 生石灰对于土壤裂缝发育影响不显著, 黄腐酸、鱼塘底泥促进土壤裂缝发育, 生物炭可以抑制土壤裂缝的发育。研究结果可为农业生产中使用改良土壤剂改良土壤理化性质提供参考。

关键词: 土壤改良剂; 土壤物理; 干燥收缩; 土壤裂隙

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0119-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.016

Effects of Exogenous Additives on the Characteristics of Soil Dry Shrinkage Cracks

CHEN Shangmao¹, GUO Peng^{1,2}, DENG Bo¹, WEI Leijia¹, MA Ze¹, CHEN Dan¹, BI Lidong¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100;

2. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014)

Abstract: To investigate the effect of exogenous additions on the characteristics of soil drying and shrinkage crack. Three utilization types of soil samples were selected for paddy field, dry field and forest land and four exogenous additives including quicklime (1 g/kg), fulvic acid (10 g/kg), fish pond sediment (250 g/kg), and biochar (15 g/kg), were added to conduct soil drying and shrinkage tests. The results showed that, in addition to quicklime, the change trend of soil drying shrinkage crack characteristics of different land types under different soil amendment treatments was very consistent, and the surface density, length density and average width of crack showed the change trend of cultivated layer paddy field>dry field>forest land, and plow bottom paddy field>forest land>dry field. Quicklime has no significant effect on soil dry shrinkage crack characteristics; fulvic acid increased the surface density of soil dry shrinkage cracks and the average width, but had no significant effect on the length density of soil dry shrinkage cracks; fish pond sediment increased the surface density of soil cracks and the length density, but had no effect on the average width of dry shrinkage cracks; biochar reduced the surface density of soil cracks and the average width of cracks, but increased the average length density of cracks. Compared with the blank control, the degree of influence of different exogenous additives on the density of soil fracture surface were as follows: Cultivated layer fish pond sediment>biochar>fulvic acid>quicklime, plow bottom fulvic acid>fish pond sediment>biochar>

收稿日期: 2023-05-18

资助项目: 国家重点研发计划专项(2020YFD0900703)

第一作者: 陈上茂(1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail: 1783391882@qq.com

通信作者: 毕利东(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤结构与土壤侵蚀研究。E-mail: bilidong@hhu.edu.cn

quicklime; the degree of influence on fracture length density was as follows: Cultivated layer biochar > fish pond sediment > quicklime > fulvic acid, plow bottom biochar > fish pond sediment > fulvic acid > quicklime in the plough bottom layer. Exogenous additives have an important effect on the characteristics of soil cracks. Quicklime has no significant effect on the development of soil cracks. Fulvic acid and fish pond sediment can promote the development of soil cracks, and biochar can inhibit the development of soil cracks. The results can be used to improve the physical and chemical properties of soil using improved soil agents in agricultural production.

Keywords: soil amendment; soil physical; drying shrinkage; soil cracks

土壤裂缝又可称为土壤裂隙,是土体自身内在理化性质和外在条件相互作用的结果^[1]。土壤黏粒、容重、有机质及人为干扰等都是影响土壤裂缝发育的主要因素^[2]。裂缝的存在促进优先流的形成^[3],对不同灌溉方式下水肥运移^[4]、溶质运输^[5]造成影响,加快土壤养分流失,增加地下水污染风险^[6]。裂缝的进一步发育降低土壤团聚体稳定性,破坏土体内部结构^[2,7],因此,研究土壤裂缝对于农田水肥管理、土体结构稳定具有重要意义。

目前,国内外学者对土壤裂缝展开了大量研究。王玮等^[8]研究发现,再生水灌溉能够抑制红壤干缩裂缝的发育,但却促进潮土、紫色土、水稻土干缩裂缝的发育,并且土壤类型与再生水浓度对于裂缝发育具有交互作用;邢旭光等^[9]研究发现,不同土壤添加物(小麦秸秆、麦壳和植物油渣)能够降低土壤裂缝面积,减轻土壤的开裂程度,有效抑制土壤裂缝发育,提高土壤持水性能;Tang 等^[10]研究表明,聚丙烯纤维的添加可以提高黏土抗裂性,并且随着纤维含量增加,土壤表面裂缝比降低;Izzo 等^[11]采用生物聚合物黄原胶和再生地毯纤维作为土壤改良添加剂,对高岭土进行干燥开裂试验发现,添加剂能够减小土壤开裂,并且纤维添加量为 2% 时对土壤开裂抑制效果最好。

当前我国耕地质量不乐观,土壤退化、酸化、盐渍化问题突出^[12]。外源添加物应用改良土壤越来越广泛,作为土壤改良剂,可改善土壤 pH^[13],降低土壤酸化对作物的影响;同时,还能影响土壤容重、有机质含量、团粒结构等^[14],进而作用于土壤收缩能力,对裂缝的发育产生影响。反之,裂缝的进一步发育同样会反作用于土壤,加速土壤养分流失,降低土体稳定性,影响外源添加物的改良效果。目前,外源添加物对于土壤改良的研究主要集中于土壤 pH、土壤肥力养分等基本理化性质,外源添加物作为土壤改良剂对于土壤裂缝的影响鲜见报道。因此,研究外源添加物对于土壤干缩裂缝的影响不容忽视。以 3 种不同利用类型土壤为研究对象,通过室内自然干燥收缩试验,分析外源添加物对土壤裂缝发育的影响,以期对农田土壤改良效果和改良后水肥管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

试验所用土样取自江苏省南京市江宁区涧边(31°55′11″N, 118°58′45″E),属亚热带季风气候,多年平均降水量 1 021.7 mm,年平均气温 15.5℃,地势平坦,采样区域海拔高程为 16~20 m。江宁区地形地貌多样,主要以低山丘陵岗地为主,土壤类型主要包括水稻土、潮土、红壤、黄棕壤等^[15]。选取当地林地、水田、旱田 3 种典型农业用地,林地为水改林,种植的是板栗树,树龄 5—10 年,水田种植水稻,旱田种植各类蔬菜,包括油麦菜、生菜、萝卜等。根据不同土层颜色差异确定耕作层和犁底层,采集耕作层和犁底层土壤。土壤类型按照《中国土壤系统分类检索》^[16]系统分类,林地属于普通铁聚水耕人为土,水田属于普通铁聚水耕人为土,旱田属于普通土垫旱耕人为土。土样采集于 2021 年 11 月,土壤干燥收缩试验于 2022 年 1 月进行。

土壤风干至恒重后碾碎、挑除植物根系等杂物,过 2 mm 筛装袋备用,每个土样取约 100 g,用土碾磨碎至过 100 目土壤筛(筛孔直径为 0.149 mm),用以测定养分含量和机械粒径组成,使用环刀法测定各典型用地类型各土层的容重,土壤孔隙度为土壤容重—土粒密度—土壤孔隙度换算得到(土粒密度为 2.65 g/cm³),用电位计法测定各土壤 pH,土壤有机质含量用重铬酸钾容量—外加热法^[17]测定。各土样基础理化性质见表 1。

1.2 外源添加物

选取生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥、生物炭 4 种典型土壤外源添加物。生石灰常用于酸化土壤治理和受重金属污染土壤中重金属元素的固定,具有很好的土壤改良作用;黄腐酸是天然有机大分子化合物,能够直接溶于水,促进土壤微生物的生长,可有效增加土壤肥力;鱼塘底泥中是渔业生产所产生的废弃物,但其中含有大量的有机质和植物生长所需要的营养元素,具备改良土壤的潜力。将鱼塘底泥用于改良土壤能够减少渔业生产废弃物;生物炭作为新型土壤改良剂,能够提高土壤持水性,改善土壤理化性质^[13],并且取材方便来

源广泛,可由各类农业废弃物如稻壳、秸秆等制成,生物炭的制作能够减少各类农业废弃物。

表 1 供试土壤理化性质

用地类型	土壤类别	发生层次	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤孔隙度/%	pH	黏粒含量/%	有机质含量/(g·kg ⁻¹)
林地	普通铁聚水	耕作层	0—20	1.28±0.05	51.84±1.80	5.27	20.0±0.33	16.44±0.66
	耕人为土	犁底层	20—40	1.49±0.06	43.77±2.17	6.40	22.6±0.55	8.26±0.49
水田	普通铁聚水耕	耕作层	0—15	1.21±0.08	54.44±3.03	6.27	27.9±0.27	23.10±0.89
	人为土	犁底层	15—30	1.41±0.05	46.87±1.98	7.62	34.3±0.48	6.76±0.83
旱田	普通土垫旱耕	耕作层	0—15	1.31±0.06	50.63±2.22	6.58	22.3±0.32	18.35±0.46
	人为土	犁底层	15—30	1.63±0.04	38.57±1.63	7.45	23.1±0.60	8.50±0.69

注:表中数据均为平均值±标准差。

所用生石灰购自国药集团化学试剂有限公司,为分析纯氧化钙,氧化钙含量>98%,生石灰参考李春英等^[18]研究选定施用剂量(1 g/kg)。黄腐酸购自北京博威神农科技有限公司,为生化黄腐酸,由植物秸秆发酵而成,易溶于水,偏弱酸性,pH 为 5~6,生化黄腐酸含量≥95%,黄腐酸参考刘佳欢等^[19]研究选定施用剂量(10 g/kg)。鱼塘底泥取自南京市水产科学研究所禄口基地,底泥经过阴凉处风干、碾碎后过 2 mm 孔径土壤筛后装袋备用,经过测定,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 32.76,2.24,1.09,20.79 g/kg,有效磷、有效钾含量分别为 45.99,17.34 mg/kg,选定施用剂量为 250 g/kg。生物炭购自河南立泽环保科技有限公司,原材料为水稻壳,在低氧环境下经高温碳化,最终形状为丝状粉末,选定施用量 15 g/kg。

1.3 试验设计及数据处理

1.3.1 试验设计 每种土样设置空白对照、生石灰(1 g/kg)、黄腐酸(10 g/kg)、鱼塘底泥(250 g/kg)、生物炭(15 g/kg)5 个处理,每个土样 3 次重复。

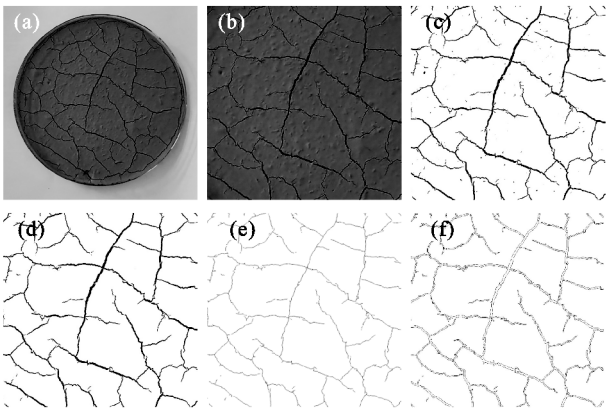
将林地、水田、旱田的耕作层和犁底层预处理后的每种土样称取 1 500 g 后分为 5 份,使用电子准确称量每份土样 100 g 于 250 mL 塑料量杯中,分别按照生石灰(1 g/kg)、黄腐酸(10 g/kg)、鱼塘底泥(250 g/kg)、生物炭(15 g/kg)的用量加入土壤外源添加物,最后 1 份为空白对照组,不加入任何土壤外源添加物。加入超纯水以使塑料量杯中土样含水率达到 50%,将塑料量杯放到电动搅拌器的支架上,调整好电动搅拌器后开动搅拌器,搅拌 1 min 后将泥浆倒入直径为 15 cm 的培养皿,用电子天平控制倒入培养皿的泥浆质量均为 140±1 g。将培养皿盖子均匀打上 5 个直径约为 1 cm 的小洞后盖在培养皿上,再将 PE 保鲜膜盖在培养皿盖子上并用橡皮筋扎住,放置在水平台上,然后在室温下培养 14 天。14 天后土样在室温下自然失水干燥,用相机拍摄记录下土样风干至恒重后的土壤裂缝。

1.3.2 图像处理及参数的计算

(1)图像处理。利用 Adobe Photoshop CC 2018

软件对拍摄图片进行剪裁→阈值分割→去噪处理。剪裁的比例为 1:1,截图模式选择 1 024 像素×1 024 像素,200 ppi,选取固定大小的区域,为减少边缘区域影响只选取约 10 cm×10 cm 的区域。

土壤裂缝照片经过 Adobe Photoshop CC 2018 软件处理过后导入 CorelDraw 软件,用中心线描摹和轮廓线描摹功能对土壤裂缝进行处理,去除图片背景色后只留土壤裂缝部分,所有照片均选择相同的细节、光滑度以及拐角光滑度。提取土壤裂缝骨架和土壤裂缝轮廓(图 1)。



注:a、b、c、d、e、f 分别为拍照后、剪裁后、阈值分割后、除杂点后、土壤裂缝骨架、土壤裂缝轮廓图像。

图 1 土壤裂缝图像处理流程

(2)裂缝特征参数的计算。目前,大多数对于裂缝的研究^[2]通常采用裂缝面积密度、长度密度等指标。本研究拟采用裂缝面密度、长密度以及裂缝平均宽度指标进行裂缝评价。

照片通过 imageJ 软件处理后,可以得到裂缝面积,裂缝面积占研究区域土壤总面积比值为土壤裂缝面密度。

图片经过 CorelDraw 软件处理提取裂缝骨架,用导出骨架图片在 imagej 里面推得单位长度裂缝骨架的黑点数量,从而计算得到裂缝长密度。

土壤裂缝平均宽度可由裂缝面密度和长密度推算得到。

1.3.3 数据处理 采用 Excel 2019 软件进行数据统

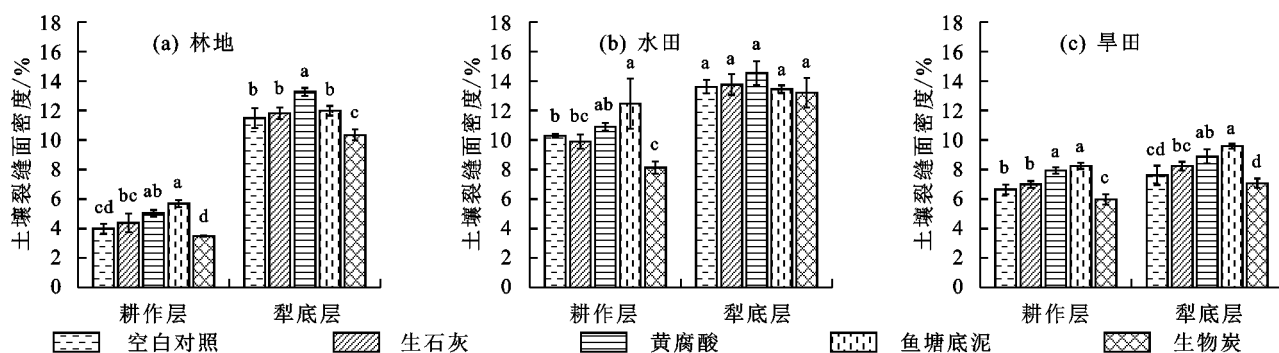
计,使用 IBM SPSS Statistics 21 软件进行数据分析,使用 Origin 2021 软件进行作图,统计差异水平用 Fisher's LSD 进行显著性差异检验,2 组数据间的相关性采用 Pearson 相关系数和显著性水平进行定量。采用 Excel 2019 以及 Z-score 标准化法进行数据标准化。

2 结果与分析

2.1 外源添加物对土壤干燥收缩裂缝面密度的影响

由图 2 可知,林地、水田、旱田耕作层土壤在不同外源添加物影响下裂缝面密度差异明显,其中,在鱼塘底泥影响下耕作层土壤裂缝面密度最大,分别达到 5.68%,12.46%,8.25%,在生物炭影响下耕作层土壤面密度最小,分别为 3.49%,8.14%,5.98%。林地和旱田耕作层土壤裂缝面密度由大到小依次为鱼塘底泥>黄腐酸>生石灰>空白对照>生物炭;水田耕作层土壤干燥收缩裂缝面密度由大到小依次为鱼塘底泥>黄腐酸>空白对照>生石灰>生物炭。鱼塘底泥和黄腐酸处理下,林地和旱田耕作层土壤裂缝面密度显著高于空白对照组($p<0.05$),生物炭处理下 3 种类型用地耕作层土壤裂缝面密度均显著低于空白对照组($p<0.05$)。

林地和旱田犁底层土壤在不同外源添加物影响



注:图柱上方不同小写字母表示同一用地类型同一土层不同土壤外源添加物处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同外源添加物对土壤干燥收缩裂缝面密度的影响

2.2 外源添加物对土壤干燥收缩裂缝长密度的影响

由图 3 可知,林地、水田耕作层土壤在不同外源添加物影响下裂缝长密度差异较小,而旱田差异较大。其中在鱼塘底泥影响下,林地耕作层土壤裂缝长密度最大,达到 1.02 cm/cm²,在生物炭处理影响下水田、旱田耕作层土壤裂缝长密度均为最大,分别达到 1.48,1.18 cm/cm²。在生石灰和黄腐酸影响下,林地耕作层土壤裂缝长密度最小,均为 0.85 cm/cm²。在黄腐酸影响下,水田耕作层土壤裂缝长密度最小,为 1.17 cm/cm²,旱田耕作层土壤裂缝长密度空白对照最小,为 0.83 cm/cm²。林地耕作层土壤裂缝长密度由大到小依次为鱼塘底泥>空白对照>生物炭>黄腐酸=生石灰,水田耕作层土壤裂缝长密度由大到小依次为生物炭>鱼塘底泥>空白对照>生石灰>黄腐

下裂缝面密度差异显著,水田差异不显著。林地、水田在黄腐酸处理下,犁底层土壤裂缝面密度最大,分别达到 13.27%,14.53%,旱田在鱼塘底泥处理下,犁底层土壤裂缝面密度最大,达到 9.59%。林地、水田、旱田在生物炭处理下,犁底层土壤裂缝面密度最小,分别为 10.34%,13.20%,7.07%。林地犁底层土壤裂缝面密度由大到小依次为黄腐酸>鱼塘底泥>生石灰>空白对照>生物炭,水田犁底层土壤裂缝面密度由大到小依次为黄腐酸>生石灰>空白对照>鱼塘底泥>生物炭,旱田犁底层土壤裂缝面密度由大到小依次为鱼塘底泥>黄腐酸>生石灰>空白对照>生物炭。黄腐酸处理下林地、旱田犁底层土壤裂缝面密度显著高于空白对照组($p<0.05$),水田犁底层土壤裂缝面密度略高于空白对照组,但差异不显著。生物炭处理下林地犁底层土壤裂缝面密度显著低于空白对照组($p<0.05$),水田、旱田犁底层土壤裂缝面密度均值低于空白对照组,但差异不显著。鱼塘底泥处理下旱田犁底层土壤裂缝面密度显著高于空白对照组($p<0.05$),林地、水田犁底层土壤裂缝面密度与空白对照组差异不显著。生石灰处理下林地、水田旱田犁底层土壤裂缝面密度均值高于空白对照组,但差异不显著。

酸,旱田耕作层土壤裂缝长密度由大到小依次为生物炭>鱼塘底泥>生石灰>黄腐酸>空白对照。林地耕作层裂缝长密度在鱼塘底泥处理下显著高于空白对照组($p<0.05$),其余处理相互无显著差异,水田耕作层裂缝长密度在生物炭处理下显著高于空白对照组($p<0.05$),其余处理相互无显著差异,旱田耕作层裂缝长密度在鱼塘底泥、生物炭处理下均显著高于空白对照组($p<0.05$),其余处理相互无显著差异。

林地、水田、旱田犁底层在不同土壤外源添加物影响下差异均显著。在生物炭处理下,犁底层土壤裂缝长密度均为最大,分别达到 1.56,1.74,1.43 cm/cm²,林地、旱田犁底层土壤长密度均为空白对照最小,分别为 1.23,0.95 cm/cm²,水田犁底层土壤长密度在生石灰处理下最小,为 1.27 cm/cm²。林地犁底层土壤裂缝长密度由大到小依次为生物炭>鱼塘底泥>生石灰>黄腐酸>

空白对照,水田犁底层土壤裂缝长密度由大到小依次为生物炭>鱼塘底泥>黄腐酸>空白对照>生石灰,旱田犁底层土壤裂缝长密度由大到小依次为生物炭>鱼塘底泥>黄腐酸>生石灰>空白对照。鱼塘底泥和生物炭处理下,林地犁底层土壤裂缝面密度显著高于空白对照组($p<0.05$),生石灰和黄腐酸处理下虽然均值高于空白对照组,但是未达到显著水平。

生物炭处理下水田犁底层土壤裂缝长密度显著高于空白对照组($p<0.05$),鱼塘底泥和黄腐酸处理下与空白对照组差异未达到显著水平。生物炭和池塘底泥处理下旱田犁底层土壤裂缝长密度均显著高于空白对照组($p<0.05$),且生物炭和鱼塘底泥处理之间差异显著($p<0.05$)。鱼塘底泥和黄腐酸处理下与空白对照组差异未达到显著水平,几乎无差异。

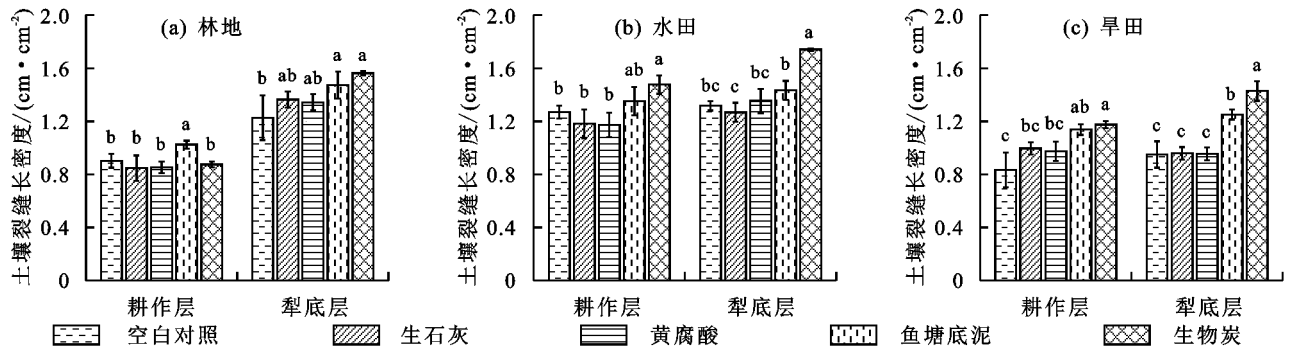


图3 不同外源添加物对土壤干燥收缩裂缝长密度的影响

2.3 外源添加物对土壤干燥收缩裂缝平均宽度的影响

由图4可知,林地耕作层土壤在不同外源添加物影响下裂缝平均宽度差异较大,水田、旱田差异不大。其中,在黄腐酸处理影响下林地、旱田耕作层土壤裂缝平均宽度最大,分别达到0.59,0.82 mm,在鱼塘底泥处理影响下,水田耕作层土壤裂缝平均宽度最大,达到0.93 mm。在生物炭处理下,林地、水田、旱田耕作层土壤裂缝平均宽度最小,分别为0.40,0.55,0.82 mm。林地耕作层土壤裂缝平均宽度由大到小依次为黄腐酸>鱼塘底泥>生石灰>空白对照>生物炭,水田耕作层土壤裂缝平均宽度由大到小依次为鱼塘底泥>黄腐酸>生石灰>空白对照>生物炭,旱田耕作层土壤裂缝平均宽度由大到小依次为黄腐酸>空白对照>鱼塘底泥>生石灰>生物炭。生石灰处理下林地耕作层裂缝平均宽度与空白对照组无显著差异,生物炭处理下数据略低于空白对照,但未达到显著水平,黄腐酸、鱼塘底泥处理下数据显著高于空白对照组($p<0.05$),生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥处理下水田耕作层裂缝平均宽度与空白对照组无显著差异,生物炭处理下裂缝平均宽度显著低于空白对照($p<0.05$),生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥处理下旱田耕作层裂缝平均宽度与空白对照组无显著差异,生物炭处理下裂缝平均宽度显著低于空白对照($p<0.05$)。

林地犁底层土壤在不同土壤外源添加物影响下差异显著,水田、旱田差异较小。其中,在黄腐酸处理下林地、旱田犁底层土壤裂缝平均宽度最大,分别达到0.99,0.86 mm,在生石灰处理下水田犁底层土壤裂缝平均宽度最大,达到1.09 mm。在生物炭处理下

林地、水田、旱田犁底层土壤裂缝平均宽度最小,分别为0.66,0.76,0.53 mm。林地犁底层土壤裂缝平均宽度由大到小依次为黄腐酸>空白对照>生石灰>鱼塘底泥>生物炭,水田犁底层土壤裂缝平均宽度由大到小依次为生石灰>黄腐酸>空白对照>鱼塘底泥>生物炭,旱田犁底层土壤裂缝平均宽度由大到小依次为黄腐酸>生石灰>空白对照>鱼塘底泥>生物炭。生石灰和黄腐酸处理下林地犁底层裂缝平均宽度与空白对照组无显著差异,但生物炭和鱼塘底泥处理下裂缝平均宽度显著低于空白对照组($p<0.05$),在生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥处理下水田犁底层裂缝平均宽度与空白对照组无显著差异,生物炭处理下裂缝平均宽度显著低于空白对照($p<0.05$)。在生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥处理下旱田犁底层裂缝平均宽度与空白对照组无显著差异,生物炭处理下裂缝平均宽度显著低于空白对照($p<0.05$)。

2.4 外源添加物对土壤干燥收缩裂缝影响差异分析

由表2可知,不同外源添加物对于裂缝面密度、长密度的影响程度存在差异。相对于空白对照,在经过数据Z-score标准化后,耕作层生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥、生物炭处理下土壤裂缝面密度对应的Z-score分值分别为0.04,0.38,0.71,-0.43;犁底层生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥、生物炭处理下土壤裂缝面密度对应的Z-score分值分别为0.15,0.53,0.31,-0.28。表明生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥总体上促进土壤裂缝面密度增长,而生物炭抑制面密度的增长。从外源添加物对土壤裂缝面密度的影响来看,其影响幅度从大到小为耕作层鱼塘底泥、黄腐酸、生物炭、生石灰,犁

底层黄腐酸、鱼塘底泥、生物炭、生石灰。相对于空白对照,经过数据 Z-score 标准化后,耕作层生石灰、黄腐酸、鱼塘底泥、生物炭处理下土壤裂缝长密度对应的 Z-score 分值分别为 0.03, -0.01, 0.88, 0.91;犁底层

则分别为 0.21, 0.34, 1.42, 2.65。从外源添加物对土壤裂缝长密度的影响来看,其影响幅度从大到小为耕作层生物炭、鱼塘底泥、生石灰、黄腐酸,犁底层生物炭、鱼塘底泥、黄腐酸、生石灰。

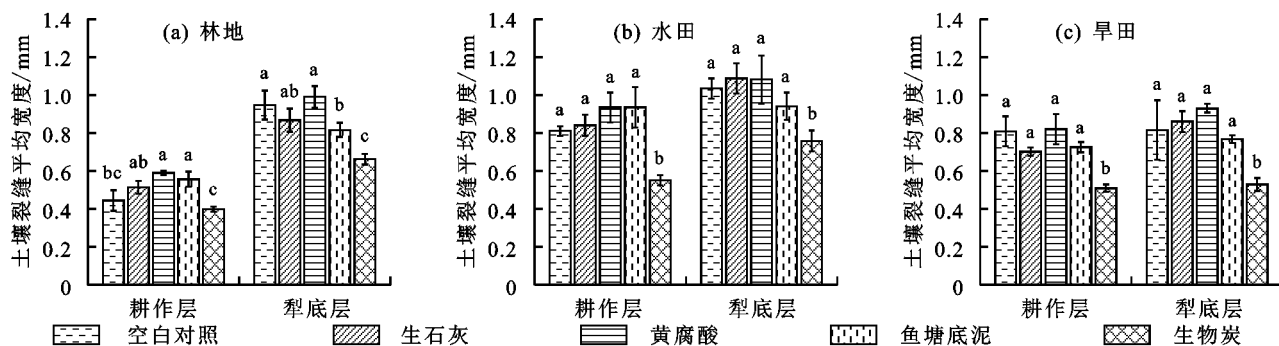


图 4 不同外源添加物对土壤干燥收缩裂缝平均宽度的影响

表 2 外源添加物对土壤裂缝面密度、长密度影响差异分析

土层	土壤裂缝面密度				土壤裂缝长密度			
	生石灰	黄腐酸	鱼塘底泥	生物炭	生石灰	黄腐酸	鱼塘底泥	生物炭
耕作层	0.04	0.38	0.71	-0.43	0.03	-0.01	0.88	0.91
犁底层	0.15	0.53	0.31	-0.28	0.21	0.34	1.42	2.65

注:以空白对照数据为标准,数据标准化后所得;表中数值为标准处理后 Z-score 值,无量纲。

3 讨论

土壤干缩裂缝主要受土壤自身理化性质及外界环境(如干湿交替、土壤添加物)等因素影响,土壤外源添加物主要通过作用于土壤收缩来影响土壤裂缝的产生^[2,20]。生石灰属于无机物类外源添加物,具有调节土壤 pH、改良土壤结构作用^[12]。连续添加生石灰可以使水稳性团聚体增加,降低土壤表面开裂面积,抑制土壤开裂^[21]。本研究中,生石灰处理下,各用地类型干缩裂缝面密度、裂缝长密度、裂缝平均宽度与空白对照无显著差异,原因可能是与生石灰添加量有关。与生石灰相比,黄腐酸、鱼塘底泥对于土壤裂缝发育的促进作用更加明显,均促进土壤的开裂程度。有研究^[22]表明,土壤容重与土壤本身收缩特征呈显著负相关。黄腐酸处理下土壤裂缝长密度与空白对照无显著差异,土壤裂缝面密度、裂缝平均宽度高于空白对照。原因可能是黄腐酸促进土壤形成团粒结构,增加孔隙体积,土壤容重降低,土壤收缩能力增强,进而促进土壤开裂^[2,14,23]。本研究表明,鱼塘底泥处理下裂缝面密度、长密度显著增加,对土壤裂缝发育具有促进作用。但其对于土壤裂缝的影响机理尚未明确,鱼塘底泥有机质含量较高,有机质含量高的土壤结构疏松,收缩能力较强^[24-25],但也有研究^[26]表明,有机质含量与土壤裂缝面密度呈较弱的负相关,可能与有机质类型有关。生物炭作为多孔性物质,可以改善土壤孔隙结构,增加土壤的持水能力^[27-28]。本研究中,生物炭处理后土壤裂缝平均宽度显著降低,虽然,裂缝长密度

有所增加,但土壤裂缝宽度对于面密度的抑制作用超过土壤长密度增加带来的影响,最终表现为土壤裂缝面密度显著降低。是因为生物炭能够降低土壤中大孔隙占比,提高微孔隙、小孔隙比例^[29],抑制土壤收缩,与文曼等^[30]研究结果一致。

本研究中,在不同外源添加物处理下各用地类型耕作层土壤裂缝面密度显著低于犁底层,与土壤自身理化性质有关^[31],两者相比,犁底层土壤黏粒含量、土壤容重高,有机质含量较低。Gray 等^[32]研究结果表明,黏粒含量对土壤收缩能力具有显著影响,土壤线性控制系数 COLE 与黏粒含量呈显著正相关,与土壤容重负相关。犁底层土壤裂缝面密度高于耕作层,原因可能是土壤黏粒含量促进裂缝发育的影响超过土壤容重、有机质含量的抑制作用。

土壤外源添加物作为土壤改良常用方法,在使用时应综合考虑改良剂对于土壤各方面理化性质的影响,生物炭作为土壤改良剂可以有效抑制土壤裂缝发育,减少土壤水分流失,对土壤基本物理性质有正效应^[17],具有良好的改良效果,采用黄腐酸、鱼塘底泥进行土壤改良时需要考虑其对土壤裂缝发育产生促进作用,从而可能导致土壤水分、肥料的流失。

4 结论

(1)除生石灰外,不同土壤外源添加物处理下各用地类型土壤干燥收缩裂缝特征变化趋势非常一致,裂缝面密度、长密度、平均宽度均呈耕作层水田>旱田>林地、犁底层水田>林地>旱田的变化趋势。

(2)不同添加物下对各类型土壤裂缝影响表现为生物炭能够有效抑制土壤裂缝的发育,黄腐酸、鱼塘底泥对土壤裂缝发育具有一定促进作用,而生石灰对于土壤裂缝发育的影响并不显著。

(3)相对于空白对照,不同外源添加物对于土壤裂缝面密度影响程度表现为耕作层鱼塘底泥>生物炭>黄腐酸>生石灰、犁底层黄腐酸>鱼塘底泥>生物炭>生石灰;对于裂缝长密度影响程度表现为耕作层生物炭>鱼塘底泥>生石灰>黄腐酸、犁底层生物炭>鱼塘底泥>黄腐酸>生石灰。

参考文献:

- [1] Yan J P, Chen X Y, Cai Y, et al. A review of genetic classification and characteristics of soil cracks[J]. *Open Geosciences*, 2021, 13(1): 1509-1522.
- [2] 周明涛,杨森,秦健坤,等.土壤裂隙研究的回顾与展望[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4): 988-995.
- [3] 尤今,王树谦.土壤裂隙对农田土壤优先流的影响及其控制因子[J]. *节水灌溉*, 2022(9): 71-75, 80.
- [4] 徐嘉惠,齐伟,刘俊,等.农田干缩裂隙对微润灌土壤水氮运移及分布的影响[J]. *节水灌溉*, 2022(7): 15-21.
- [5] 黄树辉,曾光辉.土壤裂缝产生过程中双氢胺对氮溶质运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 25-27.
- [6] 罗舒玉,邓羽松,陈洪松,等.干湿交替条件下喀斯特峰丛洼地土壤裂隙发育规律[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 387-395.
- [7] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.煤矿复垦排土场裂缝区土壤团聚体分布及稳定性[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(6): 104-110, 134.
- [8] 王玮,王辉,陈潇岳,等.再生水灌溉对亚热带典型土壤干缩裂缝演变特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 55-65.
- [9] 邢旭光,柳烨,马孝义.土壤添加物对土-水曲线和土体收缩的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(1): 40-48.
- [10] Tang C S, Shi B, Cui Y J, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(9): 1088-1101.
- [11] Izzo M Z, Miletić M. Desiccation cracking behavior of sustainable and environmentally friendly reinforced cohesive soils[J]. *Polymers*, 2022, 14(7): e1318.
- [12] 王凯,孙星星,秦光蔚,等.我国土壤改良修复工程技术研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(20): 40-48.
- [13] 张洁,李智燕,莫负涛,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *甘肃农业*, 2021(10): 92-94.
- [14] 吴军虎,李玉晨,邵凡凡,等.生化黄腐酸对土壤物理性质及水分运动特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 159-164, 171.
- [15] 褚琳琳,黄荣玉,赵燕,等.低山丘陵区不同土地利用方式田内-田埂土壤优先流特征[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(4): 115-123.
- [16] 王秋兵.中国土壤系统分类[EB/OL]. [2023-9-11]. <https://www.zgbk.com/ecph/words? SiteID=1&ID=105409&SubID=67419>.
- [17] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012.
- [18] 李春英,刘添毅,刘奕平,等.酸性植烟土壤施用石灰的后效探讨[J]. *烟草科技*, 2001, 34(7): 38-41.
- [19] 刘佳欢,王倩,罗人杰,等.黄腐酸肥料对小麦根际土壤微生物多样性和酶活性的影响[J]. *腐植酸*, 2020(1): 93.
- [20] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 477-488.
- [21] 何电源.关于稻田施用石灰的研究[J]. *土壤学报*, 1992, 29(1): 87-93.
- [22] 熊东红,周红艺,杜长江,等.土壤裂缝研究进展[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 249-255.
- [23] Zhang Z B, Peng X, Wang L L, et al. Temporal changes in shrinkage behavior of two paddy soils under alternative flooding and drying cycles and its consequence on percolation[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 12-20.
- [24] Peng X, Horn R, Smucker A. Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(4): 1095-1104.
- [25] Kechavarzi C, Dawson Q, Leeds-Harrison P B. Physical properties of low-lying agricultural peat soils in England[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 196-202.
- [26] 熊东红,杨丹,李佳佳,等.元谋干热河谷区退化坡地土壤裂缝形态发育的影响因子[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 102-108.
- [27] 王娟,黄成真,冯绍元,等.生物炭对滨海滩涂区土壤理化特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(10): 125-130, 138.
- [28] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 68-79.
- [29] 赵迪,黄爽,黄介生.生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 136-143.
- [30] 文曼,郑纪勇.生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 46-50, 5.
- [31] 段赫,刘目兴,易军,等.干湿交替条件下稻田土壤裂隙开闭规律[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 370-376.
- [32] Gray C W, Allbrook R. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils[J]. *Geoderma*, 2002, 108(3/4): 287-299.