

有机肥施配对香根草种植膨胀土影响的试验研究

陈东灵,王桂尧*,欧阳淼,杨颜齐

(长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为推动膨胀土边坡生态防护的技术进步和推广应用,针对膨胀土土壤贫瘠不利于植被生长的特点,该文提出采用有机肥改良土质,从而更好地发挥膨胀土边坡香根草护坡作用的方法。以广西膨胀土为研究对象,对不同含肥率的膨胀土进行击实和膨胀率试验,研究有机肥添加对膨胀土特性的影响;同时使用部分因子试验设计,研究不同有机肥、缓释肥以及秸秆含量,对香根草根系生长以及对根土复合体的膨胀性影响。结果表明:膨胀土最大干密度随有机肥掺量的增加而降低,最优含水率、无荷膨胀率随有机肥含量的增加而增加;缓释肥对香根草前期肥力补充效果十分显著;秸秆能抑制膨胀性,但不能影响近期的根系发育;有机肥掺量5%时,对根系数量以及膨胀性的改良最为明显,有机肥对根系生长的促进作用可以弥补其对膨胀土的不利影响,继续增加有机肥掺量,根系生长以及膨胀率改良效果的增幅逐渐下降。

关键词:膨胀土;有机肥施配;香根草根系;膨胀性;边坡防护

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Experimental Study of Effect of Organic Fertilizer Application on Swelling Soil for Vetiver Planting

CHEN Dongjiong, WANG Guiyao*, OUYANG Miao, YANG Yanqi

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: To promote the technical progress and popularization of ecological protection of swelling soil slopes, the characteristic that poor swelling soil is unfavorable to vegetation growth was considered, and a method of improving soil quality by using organic fertilizer was proposed, so as to better play the role of vetiver in protection of swelling soil slopes. The swelling soil from Guangxi Province was used as the research object, and compaction and swelling rate tests on swelling soil with different fertilizer contents were conducted to study the effect of organic fertilizer addition on the characteristics of swelling soil. Meanwhile, the partial factorial experimental design was used to study the effect of different organic fertilizer, slow-release fertilizer, and straw contents on the root system growth of vetiver and swelling of the root-soil complex. The results show that the maximum dry density of swelling soil decreases with the increase in organic fertilizer content, and the optimum moisture content and unloaded swelling rate increase with the increase in organic fertilizer content. The effect of slow-release fertilizer in promoting the early fertilization of vetiver is significant; straw can inhibit swelling, but it does not affect recent root system development. The improvement of root number and swelling rate is the most obvious when the organic fertilizer content is 5%, and the promotion effect of organic fertilizer on root system growth can compensate for its adverse effect on swelling soil. With the increase in organic fertilizer content, the improvement effect of root growth and swelling rate slows down.

Keywords: swelling soil; organic fertilizer application; root system of vetiver; swelling; slope protection

收稿日期:2024-04-27

基金项目:湖南省研究生科研创新项目(编号:QL20220195)

作者简介:陈东灵,男,硕士研究生.E-mail:1025037002@qq.com

*通信作者:王桂尧,男,博士,教授.E-mail:wanggy688@163.com

0 引言

试验研究表明^[1],在有降雨的情况下根系发达、根系强度高的香根草根系可作为一种柔性加固方法帮助膨胀土边坡控制膨胀变形和释放膨胀力。植物根系在土中交叉缠绕,形成网络,可以有效地提升土体强度,防止水土流失,从而大幅提高边坡的稳定性^[2]。湖南省、湖北省、云南省和广西壮族自治区等地区的高速公路或水利工程有很多应用香根草进行膨胀土边坡生态防护的成功案例,因此需要进一步研究膨胀土边坡的香根草根系生态防护方法具有重要的实际意义。

膨胀土生态防护的最大困难是土质贫瘠,植物生长困难。许英姿等^[3]参照土壤养分分级标准对广西膨胀土进行养分试验分析,发现与一般的根植土相比,膨胀土的土壤结构性差、养分贫瘠、pH呈中性或弱碱性、耕植性能远远不足。因此,对膨胀土进行生态护坡时,有必要额外施加肥料,但大量施用化肥会导致土壤退化、面源污染等环境负面影响^[4]。大量研究表明:有机肥对于土壤养分、养分利用效率以及土壤酶活性有显著的正向作用^[5-6];同时有机肥的有机质含量高、肥效长,可以改良土壤、维持地利,对环境十分友好^[7]。并且施用有机肥可以提高土壤有效含水量、透水性、饱和导水性,同时团粒结构更加良好,随时间推移土壤容重显著提高,能有效提高土壤物理结构特性^[8-10]。

目前,国内外对有机肥对土体物理性质影响的研究主要集中在农业领域,大量研究证明:有机肥配施可以降低土壤容重,增加总孔隙度、田间需水量、饱和含水量^[11-13];同时有机肥对植物根系、茎径、株高、生物量及壮苗指数有明显的促进作用^[14-15]。但是有机肥对膨胀土物理特性的影响以及对于生态边坡综合防治的研究尚未开展。

由此可见,有机肥是改良土质的最有效方法,但有机肥施加对膨胀土特性影响规律以及有机肥添加的根系快速生长能够发挥香根草根系固土防膨胀作用问题,国内外尚未开展研究。本文针对这些问题开展研究,有利于膨胀土边坡生态防护技术的创新进步与推广应用。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

试验用土为广西南明县膨胀土,取土深度0.1~

0.5 m,原状土呈白色带些许黄的泥岩状,室内液塑限试验、击实试验、膨胀率试验得到的土样基本物理指标如表1所示,定名为中膨胀土。

表1 膨胀土基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of swelling soil

塑限/ %	液限/ %	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最优含水率/ %	自由膨胀率/ %
22.6	50.7	1.58	24.65	64

有机肥主原料是畜禽粪便与食用菌渣,有机质含量为74.2%(以烘干基计),pH值为6.8,发酵时添加了木纤维,木纤维约占总重的1%。有机肥含水率为26.3%,经击实试验得出有机肥在该含水率下的最大干密度为0.53 g/cm³。

1.2 改性膨胀土试验方案

土体的最大干密度以及最优含水率是土体物理性质的重要指标之一。同时膨胀土中包含蒙脱石、伊利石等亲水性矿物,有强烈的吸水膨胀、失水收缩效应;干湿循环作用下,土体表面因张拉而产生裂缝,水分从裂缝中进入更深层次土体,从而降低深层次土体的强度,是导致边坡失稳的原因之一,裂隙的产生与膨胀土的膨胀性息息相关。为探究有机肥的掺入对膨胀土物理性质的影响,对改性膨胀土进行击实试验以及无荷膨胀率试验。

(1) 击实试验:将烘干后的膨胀土过5 mm筛,将有机肥以5%、10%、15%、20%的掺量加入干土中拌匀后配水。试验流程参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]。以探究有机肥的掺入对膨胀土最大干密度以及最优含水率的影响。

(2) 无荷膨胀率试验:将含肥率为0、5%、10%、15%、20%的膨胀土统一配制成25%含水率,分别以80%压实度压入环刀内,对其进行无荷膨胀率试验,试验流程参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16];以探究有机肥的掺入对膨胀土膨胀性的影响。

1.3 香根草种植试验方案

在香根草种植初期,植物的根系还不发达,对于土体的锚固作用有限。同时有机肥具有缓效性,肥力的释放随时间递增。因此,在植草前期,土体的强度与肥力都处于一个低水平状态,为了弥补前期强度与肥力的不足,在土体中掺入秸秆与缓释肥。秸秆可以弥补土体前期强度不足的问题,同时在根系成长起来后,作为养料的一部分;缓释肥是无机肥料

的一种,具有养分释放与作物需求同步的特点,在初期给植物提供稳定的养分。

为了探究最优的掺量配比,选取有机肥含量5%、10%、15%;缓释肥含量0.3 kg/m³、0.6 kg/m³、0.9 kg/m³;秸秆含量0.25%、0.5%、0.75%组合进行试验设计。假如进行全因子试验设计,需要进行3×3×3+1(对照组)即28次试验,耗费人力物力。因此,采用部分因子试验设计中的正交试验设计来研究该配比,正交表如表2所示。

表2 正交试验设计

Table 2 Orthogonal experimental design

试验编号	有机肥/%	缓释肥/(kg·m ⁻³)	秸秆/%
1	5	0.3	0.25
2	5	0.6	0.50
3	5	0.9	0.75
4	10	0.3	0.50
5	10	0.6	0.75
6	10	0.9	0.25
7	15	0.3	0.75
8	15	0.6	0.25
9	15	0.9	0.50
10	0	0.0	0.00

试验箱长×宽×高为10 cm×15 cm×35 cm,采用分层填筑和分层压实的方法,保持土的均匀性和孔隙比等物理参数一致,由下至上25 cm分5次压入,压实度为80%,下方填筑完成后放入香根草苗、覆土,顶层覆土压实度为60%,试样如图1所示。4个月后测量根系发育情况以及进行膨胀性试验。



图1 香根草模型箱试样

Figure 1 Model box specimen of vetiver

1.4 根土复合体试验方案

(1) 根系定量分析:因香根草细小根系过多,使用根系截面积与土层截面之比计算数据获取困难且难以确保精确度,故采用根重与土体体积之比来计

算含根量。通过金刚锯与剪刀配合去除种植层并将土体锯成5 cm厚的土片。各土片单独加水浸泡,待土体崩解后使用0.5 mm筛将根系筛出;洗净根系并以40℃恒温烘干称重,采用式(1)计算各层含根量:

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中: δ 为含根量(mg/cm³); m 为根系质量(mg); V 为土体体积(cm³)。

(2) 根土复合土膨胀性试验:由于相邻土层有压实度与含水率差异,因此只进行同深度无荷膨胀率试验,取样深度为5~10 cm。将试样切为5 cm厚的土片,各土片使用环刀按压取4个试样;调控试样含水率,使试样含水率尽量接近25%,具体操作如下:①当含水率小于25%时,使用滴管加水的方式提高含水率,并在补充完水分后快速使用保鲜膜包裹并固定高度;②当含水率大于25%时,使用烘箱以40℃的温度将试样含水率烘至略低于25%,随后进行含水率小于25%时的操作流程。使用环刀在土片无明显根系处压制原状土试样,计算其干密度;经实测,各个组合干密度与该有机肥掺量膨胀土80%压实度时的干密度差值不大,均在±0.04 g/cm³浮动,故将各组合干密度视作该有机肥掺量膨胀土80%压实度时的干密度。在膨胀率试验结束后,先将试样浸水崩解,再将根系筛出并烘干测量其重量,然后计算各环刀试样的含根量;通过不同含根量下的膨胀土试样的膨胀率,拟合出该层土体膨胀性随含根量变化的表达式;将该土层含根量数据代入根系定量分析中,计算出不同组合下膨胀率的变化曲线。无荷膨胀率试验流程参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]。

2 试验结果

2.1 改性膨胀土试验结果

2.1.1 击实试验

为体现更直观的试验结果,以最优含水率为纵坐标,含肥率为横坐标,拟合最优含水率随有机肥含量变化的关系曲线,如图2所示。以最大干密度为纵坐标,含肥率为横坐标,最大干密度随有机肥含量变化的关系曲线如图3所示。

最优含水率、最大干密度与含肥率变化关系曲线相关系数皆在0.97以上,拟合效果良好。最优含水率随有机肥含量的增加而线性增加,每增加5%有机肥含量,最优含水率增加0.341%;最大干密度随有

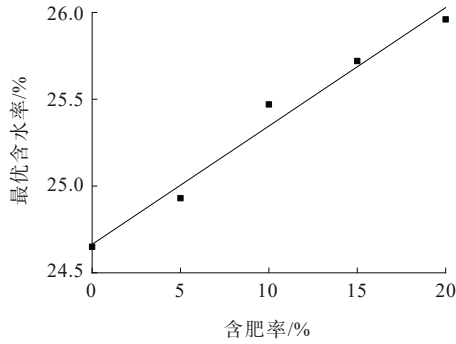


图2 最优含水率变化曲线

Figure 2 Variation curve of optimum moisture content

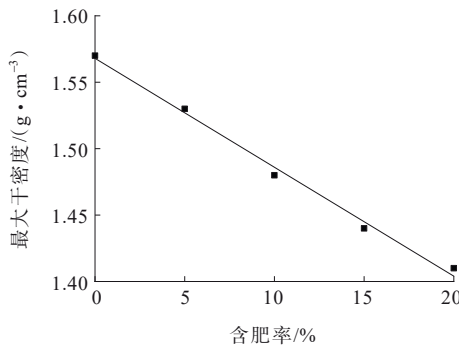


图3 最大干密度变化曲线

Figure 3 Variation curve of maximum dry density

机肥含量的增加而线性减少,每增加5%有机肥含量,最大干密度降低0.041 g/cm³。

2.1.2 无荷膨胀率试验

以含肥率为横坐标,膨胀率为纵坐标,绘制得出的膨胀率随含肥率变化曲线如图4所示。以膨胀时间为横坐标,膨胀率为纵坐标,绘制得出膨胀率在不同含肥率下随时间变化曲线如图5所示。

由图4可知:膨胀土的膨胀性随有机肥掺量的增加而增加,当有机肥掺量为20%时,其膨胀率比素膨胀土增加了26.35%。当有机肥掺量超过10%时,膨胀性随有机肥掺量增加而增长的幅度大大减小。由图5可知:有机肥的掺入使膨胀土的膨胀速率降低。素膨胀土在2 h内完成了总膨胀进程的94.9%,而掺肥率为5%~20%的膨胀土2 h膨胀率分别为最终膨胀率的86.8%、75.1%、73.4%、71.7%。其中,有机肥掺量为10%时为一个临界点,在其左边膨胀速率随有机肥的掺入快速降低,当掺入量大于10%时,其对膨胀速率降低的速度大大放缓。

2.2 香根草种植试验结果

2.2.1 根系发育情况

以土体深度为x轴,含根量为y轴,绘制含根量

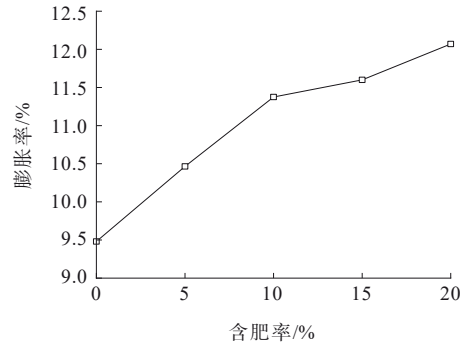


图4 膨胀率-含肥率关系曲线

Figure 4 Relationship curve of swelling rate and fertilizer content

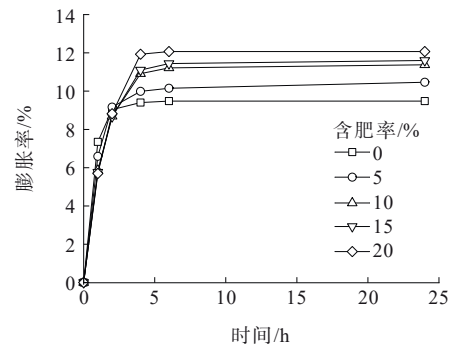


图5 膨胀率-膨胀时间关系曲线

Figure 5 Relationship curve of swelling rate and swelling time

与土层深度的关系曲线如图6所示;与试验编号10条件下香根草含根量相比,不同的肥料组合条件下,不同土层深度的含根量增加的比率也不相同,如图7所示。

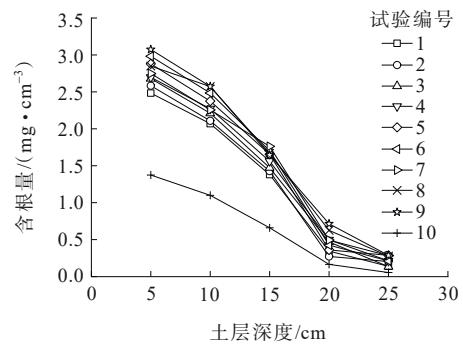


图6 含根量-土层深度关系

Figure 6 Relationship between root number and soil depth

由图6可知:施肥条件下含根量要大于对照组含根量。由图7可知:在土层深度为20 cm、25 cm时,含根率增量规律性减弱,且数值过大不利于分析,故以深度为5 cm、10 cm、15 cm的平均增量进行分析。当

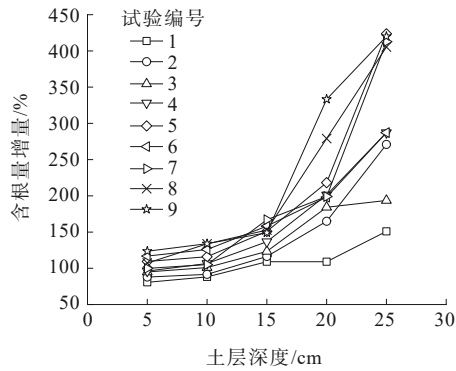


图7 含根量增量-土层深度关系

Figure 7 Relationship between root number increment and soil depth

缓释肥含量一致时,有机肥含量从5%增加至10%时含根量增量平均增加24.85%;有机肥含量从10%增加至15%时含根量增量平均增加6.21%,增长速率降低75.01%。当有机肥含量一致时,缓释肥含量从0.3 kg/m³增至0.6 kg/m³时,含根量增量平均增加8.51%;缓释肥含量从0.6 kg/m³增至0.9 kg/m³时,含根量增量平均增加6.77%,增长速率略微减小。

2.2.2 根土复合土膨胀性试验结果

通过拟合每组4个环刀试样的膨胀率-含根量曲线得出拟合公式,将2.2.1中该深度的含根量代入公式得出各组合在该层的膨胀率;通过计算各组的4个试样在各个时间点的膨胀率与最终膨胀率之比并取平均数,得出各组合在各个时间点上的平均膨胀进程,将各组膨胀率代入计算可得出膨胀率随时间变化曲线。为方便观察,将对照组10号编为编号0,其余不变,以试样编号为横坐标,膨胀率为纵坐标,绘制出膨胀率随施肥组合的变化曲线如图8所示。以膨胀时间为横坐标,膨胀率为纵坐标,绘制出膨胀率在不同组合下随时间变化曲线如图9所示。

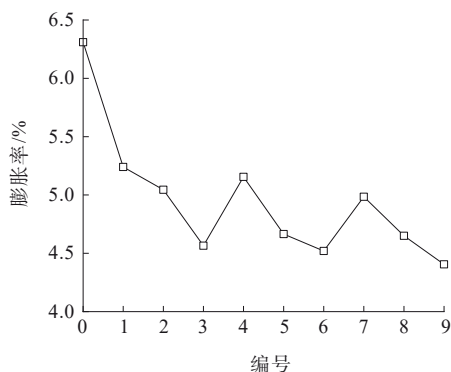


图8 膨胀率变化曲线

Figure 8 Variation curve of swelling rate

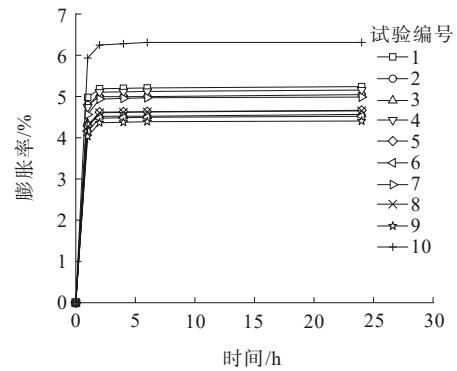


图9 膨胀率-膨胀时间关系曲线

Figure 9 Relationship curve of swelling rate and swelling time

由图8可知:膨胀率随有机肥与缓释肥含量的增加,呈现一个阶梯式下降的状态,与10号对照组相比,其膨胀率降低16.96%~30.19%;与2.1节的素土膨胀率相比,其膨胀率降低44.73%~53.53%。对比图9、图5可见:含肥率为5%时,1 h时与其最终膨胀率之比平均为95.2%;含肥率为10%和15%时分别为92.3%、91.15%。在无根土中膨胀性发展最快的是素膨胀土,在1 h时比率为75%,远小于根土复合土。

3 结果分析

3.1 有机肥对膨胀土物理性质的影响分析

有机肥密度较小,在含水率为25.8%时使用击实仪击实后的干密度为0.58 g/cm³,而素膨胀土在含水率为24.65%时达到最大干密度1.57 g/cm³,与有机肥密度相差甚远,故有机肥的掺入会导致膨胀土最大干密度降低。

有机肥掺入土体时,可以增加土体中的水稳性大团聚体的数量,团聚体是土壤小颗粒通过胶凝作用形成的,团聚体越多,土壤结构越稳定。有机肥的加入可以与土体产生胶凝作用,同时胶凝作用也需要水分的参与,当掺有机肥膨胀土的含水率小于最优含水率时,水分不足以完全湿润土体颗粒以及使有机肥充分完成胶凝作用,土体结构不密实,强度较低;当掺有机肥膨胀土的含水率大于最优含水率时,胶凝作用已反应完成,而土体处于相对潮湿的状态,黏结能力变小,结合水膜增厚,使土颗粒间的距离增加,导致土体结构性以及密度降低;当掺有机肥膨胀土处于最优含水率时,胶凝作用已完成,土颗粒间形成弱结合水膜,可以使土体在击实作用下相对轻松地移动,填满空隙且不会使土颗粒间的距离增加过

多,此时土体结构性最强且最密实。有机肥掺量增加会提高胶凝作用的需水量,且有机肥颗粒较细,可以增加土体的比表面积,比表面积增加将会导致土体吸水能力增加,因此最优含水率随有机肥的掺入而逐渐增加。

由于有机肥粒径较小,可以与膨胀土发生离子交换反应、团聚作用和胶凝作用,同时本次选用的有机肥中还含有木纤维。因此,对于膨胀性试验数据的分析,主要从3个方面开展:①木纤维与土颗粒之间的摩擦力大于土颗粒与土颗粒之间的摩擦力。当有机肥掺入较多时,纤维的量增加到足以形成网络空间约束并抑制膨胀^[17];②有机肥与膨胀土发生离子交换反应、团聚作用、胶凝作用^[18]以及木片与纤维形成的空间网络,增强了土颗粒之间的黏结作用和土体的结构性,改变了土体的渗透系数,因此导致其膨胀速率发生变化;③有机肥颗粒较膨胀土颗粒细,掺入膨胀土将会降低空隙率,使渗透系数降低,膨胀速率变慢;同时有机肥的掺入还会增加试样的比表面积,导致吸水性增加,从而加剧膨胀。

3.2 香根草根系发育情况分析

将测得的根系数据导入Stata16.0,以含根量为被解释变量(mg/cm^3),有机肥含量(%)、缓释肥含量(kg/m^3)、秸秆含量(%)为解释变量,对各个土层单独进行回归分析,结果如表3所示。

由表3可知:除土层深度为20 cm时拟合优度为0.798 5,其余土层拟合优度皆大于0.85,拟合效果良好。在土层深度为10 cm、20 cm、25 cm时,有机肥含量的变量系数在1%水平上显著,深度为5 cm、15 cm时变量系数也在5%水平上显著;缓释肥在土层深度为5 cm、10 cm时变量系数在5%水平上显著,其余土层并不显著;秸秆含量的系数估计值在各个深度中皆不显著。这说明缓释肥对根系前期的生长有着重

要的作用,但在后期无明显影响;秸秆含量的系数估计值在各个深度中皆不显著,因此表示秸秆的添加对根系的生长无明显作用。

在土层深度为0~15 cm时,有机肥平均估计系数为0.047,缓释肥平均估计系数为0.55,即每增加5%有机肥含量使含根量增加 $0.235 \text{ mg}/\text{cm}^3$,每增加 $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的缓释肥含量使含根量增加 $0.165 \text{ mg}/\text{cm}^3$,有机肥与缓释肥对含根量的促进效率之比为1.424,通过式(2)计算有机肥从0增至5%时含根量的增长率变化,最终得出有机肥由0增至15%时,含根量的增长率分别为54.46%、24.85%、6.21%;缓释肥由0增至 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,含根量的增长率分别为44.77%、8.51%、6.77%。研究表明^[19],过多地施肥会减少肥料的有效利用率,与本文各肥料对含根量影响规律一致。

$$\alpha = \frac{Y_{0-5} + Y_{5-10} + Y_{10-15}}{H_{0-5} + H_{5-10} + H_{10-15}} \quad (2)$$

式中: Y_{a-b} 为有机肥含量从 a 到 b 时根系数量的增量(%); H_{a-b} 为缓释肥含量从 a 到 b 时根系数量的增量(%); α 为促进效率之比。

3.3 香根草种植对膨胀性的影响分析

将膨胀率数据导入Stata16.0,以膨胀率为被解释变量,有机肥含量(%)、缓释肥含量(kg/m^3)、秸秆含量(%)为解释变量,回归分析得到的结果如表4所示。

缓释肥含量的变量系数在1%的置信水平显著;有机肥含量的变量系数在5%的置信水平显著;秸秆含量的变量系数在10%的置信水平显著。由表4中估计系数可知:每增加1%有机肥、 $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 缓释肥、1%秸秆,膨胀率减少0.04%、1.24%、0.16%;将该数值代入本次试验所选取的数据点,得出在本次试验中有机肥、缓释肥、秸秆使膨胀率减少的区间分别为:0.2%~0.6%;0.372%~1.116%;0.04%~0.12%。由此可知,有机肥、缓释肥、秸秆皆能抑制根土复合土膨胀率的提高,其中有机肥与缓释肥效果更显著。

表3 含根量参数估计

Table 3 Estimated root number parameter

项目	不同深度(cm)参数值									
	5		10		15		20		25	
	估计系数	P值	估计系数	P值	估计系数	P值	估计系数	P值	估计系数	P值
有机肥含量	0.05**	0.017	0.05***	0.010	0.04**	0.012	0.02***	0.009	0.01***	0.002
缓释肥含量	0.74**	0.024	0.64**	0.029	0.27	0.187	0.15	0.219	0.01	0.846
秸秆含量	0.35	0.285	0.14	0.633	0.34	0.170	-0.06	0.682	0.06	0.263
_cons	1.64***	0.000	1.34***	0.000	0.85***	0.000	0.16**	0.071	0.06*	0.064
R^2	0.876 0		0.872 2		0.850 1		0.798 5		0.881 3	

注:***、**和* 分别表示在1%、5%和10%水平上显著。

表4 膨胀率参数估计

Table 4 Estimated swelling rate parameter

变量	估计系数	标准误差	P值
有机肥含量	-0.04**	0.011	0.011
缓释肥含量	-1.24***	1.318	0.000
秸秆含量	-0.16*	0.211	0.092
_cons	6.135***	0.120	0.001
R ²		0.954 3	

注:***、**和* 分别表示在1%、5%和10%水平上显著。

由上拟合结果可知:秸秆对膨胀率的影响最小,为了方便探究有机肥与缓释肥对膨胀率的影响,将各组膨胀率与拟合得出的该组合条件下秸秆含量对膨胀率的减少值相加,得出一个不受秸秆影响下的新膨胀率曲线。将各组合膨胀率与10号对照组相减,当缓释肥含量相同时,每增加5%有机肥的掺入量使膨胀率平均降低0.17%、0.10%;当有机肥含量相同时,每增加0.3 kg/m³缓释肥的掺入量使膨胀率平均降低0.34%、0.29%。由表4得出,有机肥与缓释肥改良效率之比为0.537 6,通过式(2)计算得出有机肥含量从0增至5%使膨胀率降低0.48%;缓释肥含量从0增至0.3 kg/m³使膨胀率降低0.59%。

根系抑制膨胀性的原理与纤维加筋类似,通过根系包裹作用及根土界面的摩擦力来抵消膨胀力的作用;同时植物根系使膨胀土在吸水膨胀阶段的膨胀潜势释放大大加快,但膨胀到一定程度时,根系对土体的网络包裹约束,对膨胀潜势又有抑制作用,并且根系增大了土体的渗透系数,使土体快速达到膨胀稳定^[20-23]。结合3.2节根系的分析可见,含根量随肥料添加而增加的幅度逐步减小,因此借由根系抑制膨胀性的效率也会同步降低;其次有机肥的掺入会增加其膨胀性,抵消部分根系的改良效果。综合考虑,有机肥掺量5%、缓释肥含量0.9 kg/m³、秸秆含量0.75%,能使膨胀土达到最优改良效果,同时经济性最佳。

4 结论

(1) 有机肥掺入膨胀土会降低膨胀土的最大干密度,提高土体的最优含水率;膨胀土中添加有机肥会增加膨胀土的膨胀性,当有机肥掺量为20%时的膨胀率比素膨胀土膨胀率增加26.35%;掺入有机肥会使渗透系数降低,减少膨胀速度。当有机肥含量超过10%后,膨胀率随有机肥掺量增加而增加的幅度逐渐降低。

(2) 含根量随有机肥掺量的增加而增加,但增加的幅度逐渐降低,有机肥含量分别为10%、15%时,相对于素土其含根量增加79.31%、85.52%;含根量随缓释肥的增加而减速增加,且缓释肥在植草初期可以显著影响含根量。

(3) 根系可以有效地降低膨胀土的膨胀性,且有机肥对根系生长的促进作用可以有效地弥补掺入有机肥而导致的膨胀性增加问题,在有机肥含量为5%时,其抑制膨胀率的整体效果最优。

参考文献:

References:

- [1] 周成,路永珍,黄月华. 香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 30-35.
ZHOU Cheng, LU Yongzhen, HUANG Yuehua. Lateral limit swelling and direct shear tests of vetiver grass reinforced swelling soils with different moisture contents [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 30-35.
- [2] 包嘉邈,肖宏彬,李珍玉,等. 带根原状土抗剪强度试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 87-90.
BAO Jiamiao, XIAO Hongbin, LI Zhenyu, et al. Experimental study on shear strength of in situ soil with roots [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 87-90.
- [3] 许英姿,黄效,许松宜. 高性能植被保护垫对膨胀土边坡植被恢复影响实验研究[J]. 广西城镇建设, 2020(6): 79-81.
XU Yingzi, HUANG Xiao, XU Songyi. Experimental study on the effect of high-performance vegetation protection mats on vegetation restoration of swelling soil slopes [J]. Cities and Towns Construction in Guangxi, 2020(6): 79-81.
- [4] 吕杰,刘浩,薛莹,等. 风险规避、社会网络与农户化肥过量施用行为:来自东北三省玉米种植农户的调研数据[J]. 农业技术经济, 2021(7): 4-17.
LYU Jie, LIU Hao, XUE Ying, et al. Study on risk aversion, social network and farmers' overuse of chemical fertilizer: Based on survey data from maize farmers in three Provinces of Northeast China [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(7): 4-17.
- [5] 弓萌萌,王红,张雪梅,等. 不同有机肥施用量对苹果园土壤养分及酶活性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 74-78, 97.
GONG Mengmeng, WANG Hong, ZHANG Xuemei, et al. Effects of different organic fertilizer amounts on soil nutrient and enzyme activity of apple orchard [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 74-78, 97.
- [6] 黄文锋,郑晶星,陈建华. 一种公路岩质边坡挂渣复绿施工技术[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 44-46.
HUANG Wenfeng, ZHENG Jingxing, CHEN Jianhua. A

- construction technology of green recovery for deserted rock along highway rock slope[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2021,41(6):44-46.
- [7] 宁川川,王建武,蔡昆争.有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*,2016,25(1):175-181.
NING Chuanchuan, WANG Jianwu, CAI Kunzheng. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*,2016,25(1):175-181.
- [8] 韦智获,苏敏,张凌云,等.不同有机肥对茶叶生长和土壤物理性质的影响[J]. *安徽农业科学*,2020,48(13):159-161,178.
WEI Zhihuo, SU Min, ZHANG Lingyun, et al. Effects of different organic fertilizers on tea growth and soil physical properties[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*,2020,48(13):159-161,178.
- [9] 李梓瑄.不同耕作措施下有机物料还田对土壤物理性质的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
LI Zixuan. Effects of returning organic material to field under different tillage measures on soil physical properties [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [10] 杨佳宇,谷思玉,李宇航,等.深翻-旋耕轮耕与有机肥配施对黑土农田土壤物理性质的影响[J]. *土壤通报*,2021,52(6):1290-1298.
YANG Jiayu, GU Siyu, LI Yuhang, et al. Effects of deep ploughing-rotary tillage combined with organic fertilizer on black soil physical properties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2021,52(6):1290-1298.
- [11] 田超,刘恒青,李东利,等.粉煤灰与有机肥配施对风沙土理化性质及黑麦草生长的影响[J]. *中国土壤与肥料*,2022(7):98-106.
TIAN Chao, LIU Hengqing, LI Dongli, et al. Effects of combined application of fly ash and organic fertilizer on the physical and chemical properties of aeolian sandy soil and the growth of ryegrass[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*,2022(7):98-106.
- [12] 张艳,刘彦伶,李渝,等.长期施用化肥与有机肥对黄壤物理特性的影响[J]. *贵州农业科学*,2021,49(2):34-40.
ZHANG Yan, LIU Yanling, LI Yu, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizer and organic fertilizer on physical properties of yellow soil[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*,2021,49(2):34-40.
- [13] CAIRO P C, DE ARMAS J M, ARTILES P T, et al. Effects of zeolite and organic fertilizers on soil quality and yield of sugarcane(article) [J]. *Australian Journal of Crop Science*,2017,11(6):733-738
- [14] 江尚焘,栗晗,彭海英,等.有机肥替代部分化肥对芒果丛枝菌根真菌群落的影响[J]. *应用生态学报*,2023,34(2):481-490.
JIANG Shangtao, LI Han, PENG Haiying, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on arbuscular mycorrhizal fungal community of mangifera indica[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(2):481-490.
- [15] 陈绍荣,邵建华,陈锡东.骨钙粉型生物有机肥的研究与应用[J]. *肥料与健康*,2022,49(6):54-59.
CHEN Shaorong, SHAO Jianhua, CHEN Xidong. Study and application of bone calcium powder bio-organic fertilizer[J]. *Fertilizer & Health*,2022,49(6):54-59.
- [16] 水利部水利水电规划设计总院,南京水利科学研究所.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019
China Renewable Energy Engineering Institute, Nanjing Hydraulic Research Institute. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press,2019.
- [17] 李金蓉.木质素-玄武岩纤维改良膨胀土工程特性试验研究[D].绵阳:西南科技大学,2021.
LI Jinrong. Experimental study on engineering properties of lignin basalt fiber modified expansive soil[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology,2021.
- [18] 马缤辉,曾星,郭佳乐,等.煤矸石粉改良膨胀土的试验[J]. *矿业工程研究*,2019,34(3):66-72.
MA Binhui, ZENG Xing, GUO Jiale, et al. Experimental study on improved expansive soil of coal gangue powder [J]. *Mineral Engineering Research*,2019,34(3):66-72.
- [19] 李金鑫,刘雨,杨雅雯,等.不同有机肥和化肥配施比例对二年生射干生长、产量及品质的影响[J]. *中国实验方剂学杂志*,2022,28(23):149-156.
LI Jinxin, LIU Yu, YANG Yawen, et al. Effect of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer on growth, yield and quality of two-year-old belamcanda chinensis[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*,2022,28(23):149-156.
- [20] 杨闻达,王桂尧,张永杰,等.主根系植物对边坡土壤渗透性影响的原位试验研究[J]. *中外公路*,2018,38(2):35-39.
YANG Wenda, WANG Guiyao, ZHANG Yongjie, et al. In-situ experimental study of effects for tap root system plants on slope soil permeability[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2018,38(2):35-39.
- [21] 李润发,王桂尧,张永杰,等.种植香根草根系对膨胀土特性影响的试验研究[J]. *公路交通科技*,2020,37(5):43-52.
LI Runfa, WANG Guiyao, ZHANG Yongjie, et al. Experimental study on influence of planting vetiver root on characteristics of expansive soil[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(5):43-52.
- [22] 李松峰,陈军锋.椰纤维加筋对路基膨胀土工程性质改善效应研究[J]. *中外公路*,2022,42(5):237-240.
LI Songfeng, CHEN Junfeng. Study on effect of coir fiber reinforcement on improving engineering properties of subgrade expansive soil[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2022,42(5):237-240.
- [23] 王雨威,胡艳丽,张锐.高速公路改扩建膨胀土路堤处置方法研究[J]. *中外公路*,2024,44(1):1-8.
WANG Yuwei, HU Yanli, ZHANG Rui. Study on treatment method of expansive soil embankment in expressway reconstruction and extension[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2024,44(1):1-8.