

煤矸石对盐碱土壤绿化和土壤微生物的影响

孔涛¹, 郑爽¹, 张莹¹, 吴丹¹, 韩一诺¹, 梁冰²

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为探究煤矸石对盐碱土壤绿化的改良效果和对土壤微生物的影响, 将不同用量(0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%)和不同粒径(小粒径<1 mm, 中粒径 1~5 mm, 大粒径>5 mm, 以及小中大粒径等比例的混合粒径)煤矸石施用于盐碱土壤, 进行紫花苜蓿盆栽试验, 测定紫花苜蓿株高、生物量以及土壤微生物量和酶活性指标。结果表明, 不同粒径煤矸石处理的土壤微生物量碳氮, 土壤的脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶活性, 以及紫花苜蓿株高、生物量均随着煤矸石用量的增加呈先增大后降低的趋势, 混合粒径、小粒径、中粒径、大粒径煤矸石处理的盐碱土上述指标分别在 20%, 20%, 30%, 40%用量下达到峰值。其中, 20%用量的混合粒径煤矸石在盐碱土壤的绿化方面应用效果最好, 将紫花苜蓿株高和鲜重分别显著提高了 34.86%和 45.28%。因而, 一定用量的煤矸石可以改善盐碱土壤的生态质量, 20%用量的混合粒径煤矸石可以作为盐碱土壤绿化的改良剂。

关键词: 煤矸石; 盐碱土; 绿化; 土壤微生物量; 土壤酶活性

中图分类号: TQ536; S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0321-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.046

Effects of Coal Gangue on Revegetation and Microbial Properties of an Alkali-saline Soil

KONG Tao¹, ZHENG Shuang¹, ZHANG Ying¹, WU Dan¹, HAN Yinuo¹, LIANG Bing²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;
2. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: To investigate the effects of coal gangue on revegetation and microbial properties of an alkali-saline soil, coal gangues with different application rates (0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%) and different particle sizes (small-size of <1 mm, medium-size of 1~5 mm, large-size of >5 mm, mixed-size) were applied to an alkali-saline soil. Then the alfalfa pot experiment was conducted to determine the height and biomass of alfalfa and soil microbial biomass and enzymes activities. The results showed that soil microbial biomass C and N, activities of urease, catalase and dehydrogenase, as well as plant height and biomass of alfalfa all increased first and then decreased with the increase of coal gangue application rates. As for the mixed-size, small-size, medium-size, and large-size coal gangue treatments, the above soil properties reached their peaks when the application rates were 20%, 20%, 30%, and 40%, respectively. Among them, coal gangue application rate of 20% with mixed partial size gave the best improvement effect on revegetation of alkali-saline soil. The plant height and fresh weight of alfalfa significantly were increased by 34.86% and 45.28%, respectively. Therefore, the application of coal gangue could improve the ecological quality of saline-alkali soil. The coal gangue with mixed particle size and 20% application rate could be used as an effective amendment for the revegetation of alkali-saline soil.

Keywords: coal gangue; alkali-saline soil; revegetation; soil microbial biomass; soil enzyme activity

煤矸石是一种在煤形成过程中与煤伴生、共生的岩石,在煤炭开采和加工过程中作为固体废弃物排出,其产量相当于煤炭产量的 1/10,目前已成为我国排放量最大的工业固体废弃物^[1]。大量堆放的煤矸

石不仅造成土地浪费,而且会对大气、水体和土壤造成污染,对环境健康和人体健康均造成危害^[2]。因此,如何将煤矸石资源化利用已成为煤炭行业可持续发展的重要问题。土地盐碱化属于土地荒漠化的一

种,是土地退化中的最大难题,可使土壤肥力下降,植物根系吸水困难,甚至不能生长。据估计,全球有 9.5 亿 hm^2 的盐碱地^[3]。在中国,盐碱地的面积大约是 3 600 万 hm^2 ^[4]。园林绿化在生态建设中起着重要作用,而在盐碱地区,由于盐碱土壤肥力低,黏重易板结,植物成活困难,导致绿化工作难度大。由于煤矸石自身的物理性状,土壤中施加适量的煤矸石可以改善土壤容重、孔隙度等物理性质^[5];同时由于煤矸石中含一定量的氮磷钾元素^[6-7],可以提高土壤中的养分含量。因此,煤矸石具有改善盐碱土壤的潜质。

土壤微生物量是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力,也是土壤中植物有效养分的储备库^[8]。土壤酶是土壤物质循环和能量流动的重要参与者,是土壤生态系统中最活跃的组分之一^[9]。土壤微生物量和酶活性等土壤生物指标比土壤理化性质更能敏感地对土壤质量的变化做出响应^[10]。由于土壤酶活性的底物专一性和反应专一性,很难从单独一个酶活性评价整体土壤状态。因此研究人员将几种土壤酶活性整合起来开发出了一些土壤质量指标来表达土壤重要生态功能,其中包括土壤肥力生物指数(BIF)^[11]、酶活性指数(EAN)^[12],两者都能够表示土壤生物肥力的高低。近年来在国内外的研究中这 2 个指标已经得到了较广泛的应用^[13-16]。因此,本研究将煤矸石应用于盐碱地的绿化中,测定煤矸石对绿化植物生物量和盐碱土壤微生物量、土壤酶活性的影响,阐明盐碱地土壤生态质量对煤矸石的响应规律,为煤矸石的开发利用和盐碱地绿化工作奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的煤矸石取自辽宁省阜新市海州露天矿的煤矸石山,为砂岩类煤矸石,由石英、长石、伊利石等矿物组成。该煤矸石的有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 144.11, 1.26, 0.69, 22.92 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 12.80, 63.52, 193.80 mg/kg, pH 6.20, 在此 pH 下,铬、铅、锌、砷、汞含量分别为 61.08, 28.52, 78.23, 3.05, 0.08 mg/kg, 符合《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的一级标准,铜含量为 37.76 mg/kg, 符合二级标准,镉、镍含量分别为 0.35, 43.71 mg/kg, 符合三级标准,三级标准即可作为林地和绿化用地,因此该煤矸石完全可以用于盐碱土壤的绿化。盐碱土取自辽宁省盘锦市大洼县的滨海盐碱地 0—20 cm 土层,所采土样是黏壤性盐碱土,根据美国土壤分类(Soil Survey Staff, 1998)属于泞湿始成土(Halaquepts)。该盐碱土壤质地黏重,透气性差, pH 9.21, 电导率 1.67 dS/m, 阳离子交换量 38.56 cmol/kg, 土壤容重 1.67 g/cm³; 粒径组成中,砂粒(2~0.05 mm)占 24.75%, 粉粒(0.05~0.002

mm)占 37.17%, 黏粒(<0.002 mm)占 38.08%; 养分组成中,该土壤的有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 8.45, 0.37, 0.44, 13.06 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 34.62, 37.68, 207.39 mg/kg。在进行盆栽试验之前,将土样自然风干,粉碎后通过 2 mm 筛子,去除可见的根、石子等。

1.2 试验设计

盆栽试验同时考虑了煤矸石粒径和用量因素组合对盐碱地绿化效果的影响,共设置了 24 组处理。煤矸石粒径分为 3 种,分别为小粒径<1 mm, 中粒径 1~5 mm, 大粒径>5 mm, 同时考察了 3 种粒径等比例混合的效果。煤矸石用量占盐碱土壤的比例分别为 0(CK), 10%, 20%, 30%, 40%, 50%。每组处理设置 3 个重复。紫花苜蓿属于多年生草本植物,主根粗壮,枝叶繁茂,生态适应性强,耐干旱,能在贫瘠土壤中生长,播种一次后可持续生长多年,与木本植物相比,其生长迅速,因而是一种较理想的绿化物种。因此,本研究选择紫花苜蓿作为试验植物。花盆上口径 10 cm, 底径 7 cm, 高度为 8 cm, 将不同粒径和不同用量的煤矸石与盐碱土混匀后装盆,每盆中装入 250 g, 浇足底水后,每盆撒入 50 粒紫花苜蓿种子。等紫花苜蓿长至 2 cm 高时,每盆间苗至 20 株。盆栽试验从 2017 年 5 月 20 日开始,经过 90 天的培养,于 2017 年 8 月 20 日收获,测定紫花苜蓿株高、生物量,同时采集土样,过筛,冷藏,测定土壤微生物量和土壤酶活性。

1.3 测定方法

土壤微生物量碳氮采用熏蒸浸提法^[17]测定。磷酸酶(Phosphatase, PH)活性采用对硝基苯磷酸盐法^[18]测定;脱氢酶(Dehydrogenase activity, DH)采用氯化三苯基四氮唑比色法^[18]测定;淀粉酶(Amylase activity, AM)活性采用二硝基水杨酸比色法^[18]测定;脲酶(Urease activity, UR)活性采用次氯酸钠比色法^[19]测定;过氧化氢酶(Catalase activity, CA)活性采用容量法^[20]测定;蛋白酶(Protease activity, PR)活性采用茆三酮比色法^[21]测定。

土壤肥力生物指数(Biological index of fertility, BIF) = $(1.5 \times \text{DH} + k \times 100 \times \text{CA}) / 2$
式中: k 为比例系数,一般取 0.01^[11]。

酶活性指数(Enzyme activity number, EAN) = $0.2 \times (0.15 \times \text{DH} + \text{CA} + 1.25 \times 10^{-5} \times \text{PH} + 4 \times 10^{-2} \times \text{PR} + 6 \times 10^{-4} \times \text{AM})$ ^[12]

1.4 数据分析

所有的数据均在土壤烘干(105 °C)重量的基础上进行计算。所有的试验数据应用 SPSS 17.0 软件进行方差分析,显著性差异比较;采用 Excel 2007 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 煤矸石对盐碱土壤盆栽紫花苜蓿株高和生物量的影响

从图1可以看出,各粒径煤矸石处理下的紫花苜蓿株高和生物量均随着煤矸石用量增加呈现先增加后减小的趋势。混合粒径和小粒径的煤矸石在20%的用量下紫花苜蓿株高和生物量达到最大值,混合粒径处理的株高和生物量比对照提高34.86%和45.28%,小粒径分

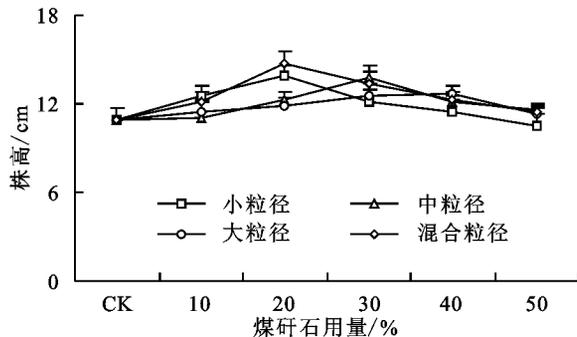
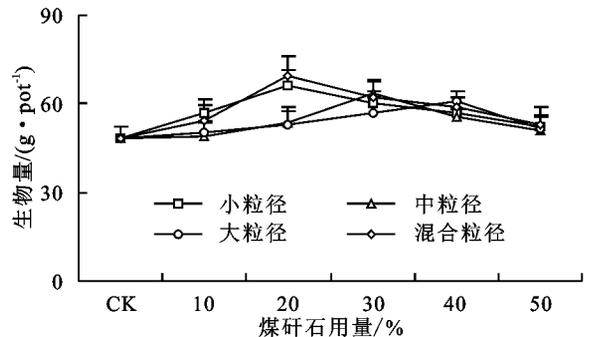


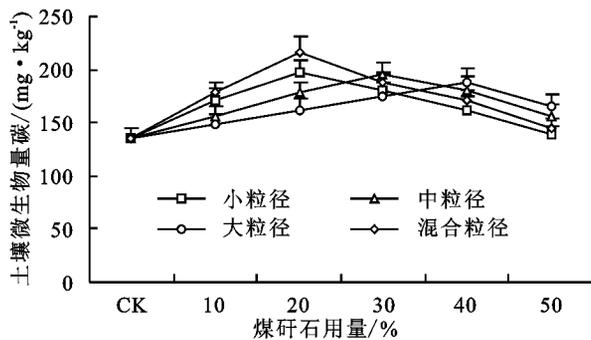
图1 煤矸石对盐碱土壤紫花苜蓿株高和生物量的影响

别提高27.52%和37.56%;中粒径煤矸石在30%用量下达到最大值,比对照提高26.61%和31.98%;大粒径煤矸石在40%用量下达到最大值,比对照提高16.51%和26.65%。各粒径处理的株高和鲜重最大值之间进行比较,表现为混合粒径>小粒径>中粒径>大粒径。在20%用量下,混合粒径和小粒径处理的株高和生物量显著高于中粒径和大粒径处理。其他煤矸石用量下,各粒径之间的株高和生物量差异不显著。



2.2 煤矸石对盐碱土壤微生物量碳氮的影响

从图2可以看出,不同粒径煤矸石处理的土壤微生物量碳氮含量均随着煤矸石用量的增加呈现先增大后降低的趋势;其中混合粒径和小粒径煤矸石在20%的用量下土壤微生物量碳氮最高,其土壤微生物量碳分别比对照显著提高58.82%和45.59%,土壤微生物量氮比对照显著提高68.02%和52.91%;中粒径煤矸石在30%的用量下土壤微生物量碳氮最高,分别比对



照显著提高43.38%和49.42%;大粒径煤矸石在40%的用量下土壤微生物量碳氮最高,分别比对照显著提高38.24%和44.77%。各粒径处理的土壤微生物量碳氮最大值之间进行比较,表现为混合粒径>小粒径>中粒径>大粒径。不同煤矸石用量中,20%用量下的各粒径煤矸石处理的土壤微生物量碳氮差异最大,混合粒径显著大于中粒径和大粒径,与小粒径没有显著差异。

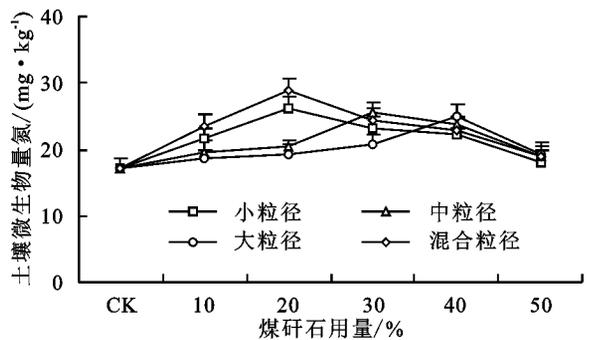


图2 煤矸石对盐碱土壤微生物量碳氮的影响

2.3 煤矸石对盐碱土壤酶活性的影响

从图3可以看出,土壤淀粉酶、蛋白酶和磷酸酶活性呈现基本一致的趋势,随着煤矸石用量的增加而持续提高;在50%的煤矸石用量下,混合、小、中、大4种粒径煤矸石处理的淀粉酶分别比对照提高70.92%,92.62%,46.76%和31.10%,蛋白酶分别提高475.86%,508.05%,408.05%和312.64%,磷酸酶分别提高57.84%,63.73%,51.96%和31.37%。在同一煤矸石用量下,3种酶活性大小均呈现出小粒径>混合粒径>中粒径>大粒径的规律,且随着煤矸石用量的增加,不同粒径间3种酶活性的差异持续增加。

土壤的脲酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性规律基本

一致,随着煤矸石用量的增加,3种酶活性先提高后降低。混合粒径和小粒径煤矸石处理的3种酶活性在20%煤矸石用量下达到峰值,在此用量下,混合粒径煤矸石处理的土壤脲酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性分别比对照显著提高112.07%,37.91%和295.65%,小粒径煤矸石处理分别显著提高84.48%,33.01%和269.57%。中粒径和大粒径煤矸石处理的上述3种酶活性分别在30%和40%用量下达到峰值,30%用量下中粒径处理的3种酶活性分别比对照显著提高77.59%,31.05%和247.83%,40%用量下大粒径处理显著提高63.79%,26.80%和221.74%。不同粒径煤矸石处理的此3种酶活性的峰值呈现了一致的

顺序:混合粒径>小粒径>中粒径>大粒径。不同用量中,在 30%煤矸石用量下不同粒径煤矸石处理的 3 种酶活性差异最大,大致表现为混合粒径、小粒径处理显著高于中粒径和大粒径处理。

土壤的生物肥力指数 BIF 随着煤矸石用量的增加先提高后降低。混合粒径和小粒径煤矸石处理的 BIF 在 20%煤矸石用量下达到峰值,分别比对照显著提高了 174.50%和 158.37%。中粒径煤矸石处理的 BIF 在 30%用量下达到峰值,比对照显著提高了 145.93%。大粒径煤矸石处理的 BIF 在 40%用量下达到峰值,比对照显著提高了 130.11%。与土壤生物肥力指数 BIF 的变化规律不同,酶活性指数 EAN

随着煤矸石用量的增加先增加,而后基本保持稳定或略有降低。混合粒径和小粒径煤矸石处理的 EAN 在 20%煤矸石用量下达到峰值,分别比对照显著提高了 73.59%和 69.28%,随着煤矸石用量的继续增大,EAN 略有降低。中粒径和大粒径煤矸石处理的 BIF 和 EAN 分别在 30%和 40%用量下达到峰值,而后基本保持稳定。不同粒径煤矸石处理的 BIF 和 EAN 的峰值呈现了一致的顺序:混合粒径>小粒径>中粒径>大粒径。不同用量中,在 30%煤矸石用量下不同粒径煤矸石处理的 BIF 和 EAN 差异最大,表现为混合粒径、小粒径处理显著高于中粒径和大粒径处理。

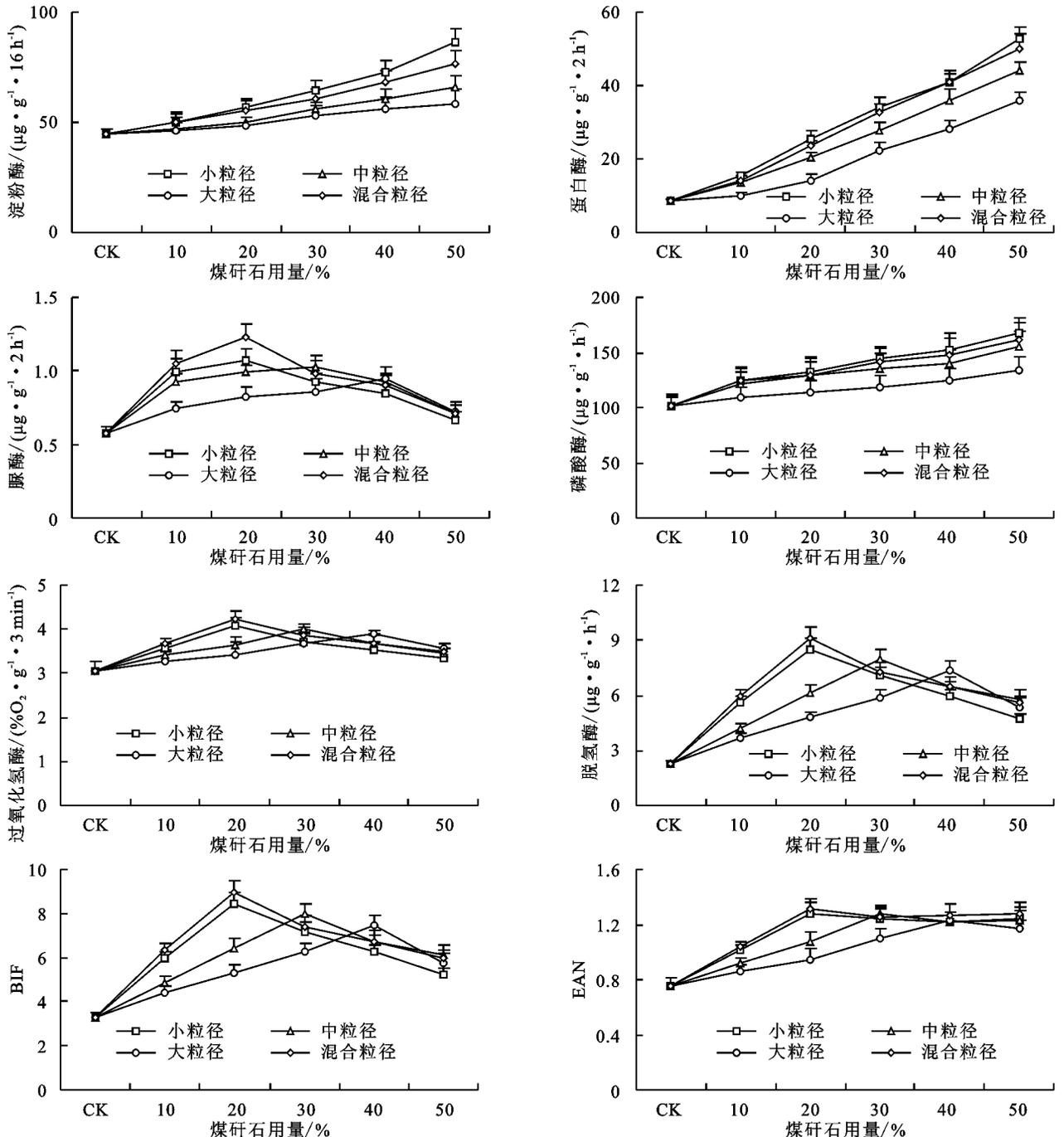


图 3 煤矸石对盐碱土壤酶活性的影响

3 讨论

3.1 土壤微生物量

土壤微生物是土壤营养物质循环的重要参与者,土壤微生物量碳氮是植物有效养分的储备库。本研究中,煤矸石粒径越大,土壤微生物量碳氮达到峰值时需要的煤矸石用量越多,原因在于煤矸石粒径越大,比表面积越小,可供微生物栖息和利用的养分就越少,因而达到峰值时需要的煤矸石量就越多。随着煤矸石用量的继续增加,土壤微生物量碳氮达到峰值后开始持续降低,原因在于煤矸石用量过多,土壤中积累的重金属等有害物质就越多,从而抑制了土壤微生物的增殖,导致了土壤微生物量在煤矸石达到一定用量后开始降低。同时,混合粒径的煤矸石达到峰值时的煤矸石用量和小粒径处理相同,但峰值大于小粒径煤矸石处理,原因在于土壤微生物量还受到土壤水分和通气性的影响,煤矸石粒径过小,施入土壤后空隙小,水含量过多,通气性差,而混合粒径煤矸石既保证了土壤微生物充足的养分,又具有合适的水分含量和通气性,因而混合粒径煤矸石处理的土壤微生物量碳氮含量高于小粒径处理。

3.2 土壤酶活性

本研究中,土壤淀粉酶、蛋白酶、磷酸酶活性均随煤矸石用量的增加而持续提高。淀粉酶可把土壤中的淀粉分子分解为蔗糖和单糖,供植物吸收利用,其活性可反映土壤有机质的积累和转化情况^[22]。蛋白酶是土壤有机氮水解为氨基酸过程中重要的酶,能够分解蛋白质和肽类,是促进土壤氮循环的重要组成部分^[23]。磷酸酶是土壤中广泛分布的一种水解酶,能够催化磷酸酯的水解反应,在土壤磷素循环中起着重要作用,其活性高低直接影响土壤有机磷的分解转化速率^[24]。随着煤矸石用量的增加,土壤微生物量先增大后降低,土壤酶来源于土壤微生物,因而土壤酶蛋白的数量也应先增加后降低。然而,土壤淀粉酶、蛋白酶和磷酸酶活性并未呈现与土壤微生物量和土壤酶蛋白数量一致的趋势,原因在于土壤酶活性并不单纯取决于土壤酶蛋白的数量,其与酶的底物等其他因素也有很大的关系,随着煤矸石用量增加,盐碱土壤的有机质、总氮和总磷含量在持续提高,而土壤有机质、总氮和总磷分别作为淀粉酶、蛋白酶和磷酸酶的底物,诱导了相应酶活性的持续提高,弥补并超过了高用量煤矸石处理下酶数量减少导致的负效应。从煤矸石粒径上分析,总体而言,同一煤矸石用量下表现为小粒径>混合粒径>中粒径>大粒径。原因在于粒径越小,比表面积越大,土壤酶能够转化利用的底物越多,因而酶活性越大。

土壤脲酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性随着煤矸石

用量的增加先增大后减小。土壤脲酶是土壤中的聚积酶,动植物残体分解释放和土壤微生物的分泌是其主要来源。脲酶能促进尿素的分解,可以表征土壤氮素供应状况^[25]。土壤过氧化氢酶能够将过氧化氢水解为水和氧气,解除过氧化氢对植物的毒害作用,用来表征土壤的总生化活性,在土壤物质和能量转化中占重要地位^[26]。土壤脱氢酶能促进有机物脱氢,起着氢的中间传递体的作用,可以表征土壤微生物的活性^[27]。随着煤矸石用量的增加,土壤的微生物量呈现先增加后减少的趋势,而土壤微生物是土壤脲酶的主要来源,因而土壤脲酶呈现了与土壤微生物量一致的规律。土壤过氧化氢酶和脱氢酶活性能够表示土壤的生物活性,表明随着煤矸石用量的增加,盐碱土壤的生物活性先增加后减少,与土壤的微生物量呈现了一致性。

本研究中,随着煤矸石用量的增加,土壤的生物肥力指数 BIF 先提高后降低,而土壤酶活性指数 EAN 先提高后基本保持稳定或略有降低。Stefanic 等^[12]报道了 BIF 在一系列土壤中的值为 0.9~17.2, Beck^[11]报道了 EAN 在耕种土壤的值是 1~4。可以看出,本研究中 BIF 值和 EAN 值均位于 2 位学者^[11-12]提出的范围内。2 个综合性酶指数表现一致的是不同粒径煤矸石均在相应的煤矸石用量下达到峰值,表明混合粒径和小粒径煤矸石处理的盐碱土壤生物肥力在 20% 用量下最高,中粒径在 30% 用量下最高,大粒径在 40% 用量下最高。

4 结论与展望

(1)不同粒径煤矸石处理的土壤微生物量碳氮,土壤的脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶活性,以及紫花苜蓿株高、生物量均随着煤矸石用量的增加呈现先增大后降低的趋势,混合粒径、小粒径、中粒径、大粒径煤矸石处理的盐碱土上述指标分别在 20%, 20%, 30%, 40% 用量下达到峰值。不同粒径煤矸石处理的上述指标的峰值顺序大小为:混合粒径>小粒径>中粒径>大粒径。

(2)20% 用量的混合粒径煤矸石在盐碱土壤的绿化方面应用效果最好,可以作为盐碱土壤绿化的促进剂。本研究结果为煤矸石的资源化利用以及盐碱土壤的绿化提供了可行的技术指标和理论基础,具有广阔的应用前景。

本研究中盆栽试验周期为 90 天,时间较短,若进行长期试验,在自然状态下,煤矸石在下雨、冻融、微生物和植物等的影响下,其粒径将变小,量也随着消耗而变少,本研究的规律表明,对单一粒径而言,在一定范围内,粒径越小,用量越少,盐碱土壤绿化的主要指标值越高,因而,从长期来看,煤矸石将继续在一定

时期内改良盐碱土壤的生态质量,促进绿化,效果可能会更好;对混合粒径而言,由于混合物中各粒径和量均变小,本研究尚无相应的规律可供推测。因此,煤矸石对盐碱土壤绿化的长期促进作用有必要进一步研究和证实。

参考文献:

- [1] 段锋,马爱琼,肖国庆,等.煤矸石在高温材料中的应用研究进展[J].硅酸盐通报,2013,32(9):1811-1816.
- [2] 王心义,杨建,郭慧霞.矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污染研究[J].煤炭学报,2006,31(6):808-812.
- [3] Sumner M E, Naidu R. Sodic soils: Distribution, properties, management and environmental consequences [M]. New York: Oxford University Press,1998:22-24.
- [4] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):12-16.
- [5] 唐升引,蒋永吉,陈静,等.煤矸石主要物理特性及在栽培基质中应用的可行性分析[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):209-213.
- [6] 郑彬,许丽,王开云,等.阜新矿区煤矸石风化物全量养分研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009,30(3):107-111.
- [7] 袁向芬,谢承卫.利用巨大芽孢杆菌制备高硫煤矸石肥料[J].环境工程学报,2015,9(2):946-950.
- [8] 何振立.土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义[J].土壤,1997,29(2):61-69.
- [9] Zornoza R, Guerrero C, Mataix-Solera J, et al. Assessing air-drying and rewetting pre-treatment effect on some soil enzyme activities under Mediterranean conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry,2006,38(8):2125-2134.
- [10] Doran J W, Jones A J. Methods for assessing soil quality [J]. Scientia Horticulturae,1996(4):355-356.
- [11] Beck T. Methods and application of soil microbiological analysis at the Landensanstalt fur Bodenkultur and Pflanzenbau(LBB) for the determination of some aspects of soil fertility[C]// Nemes M P, Kiss S, Papacostea P, et al. Proceedings of the fifth Symposium on Soil Biology. Bucharest: Rumanian National Society of Soil Science,1984:13-20.
- [12] Stefanic G, Eliade G, Chirnoageanu I. Researches concerning a biological index of fertility[C]//Nemes M P, Kiss S, Papacostea P, et al. Proceedings of the fifth symposium on soil biology. Bucharest: Rumanian National Society of Soil Science,1984:35-45.
- [13] Kang G S, Beri V, Sidhu B S, et al. A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005,41(4):389-398.
- [14] Saviozzi A, Cardelli R, Puccio R D. Impact of salinity on soil biological activities: A laboratory experiment [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2011,42(6):358-367.
- [15] Liao Y P, Min X B, Yang Z H, et al. Physicochemical and biological quality of soil in hexavalent chromium-contaminated soils as affected by chemical and microbial remediation[J]. Environmental Science and Pollution Research,2014,21(1):379-388.
- [16] 贾夏,董岁明,周春娟.低含量 Pb 对 Cd 处理下冬小麦根际土壤氧化还原酶活性、BIF 及 C/N 的影响[J].应用与环境生物学报,2012,18(6):917-923.
- [17] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry,1987,19(6):703-707.
- [18] Narasimha G, Sridevi A, Reddy A V S, et al. Effect of cotton ginning mill industrial effluents on soil dehydrogenase, phosphatase, amylase and invertase enzyme activities[J]. International Journal of Agricultural and Food Science,2012,2(1):1-6.
- [19] Emami S, Pourbabaee A A, Alikhani H A. Effect of paraffin on the urease activity of soil [J]. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013, 3 (15):1526-1529.
- [20] Kizilkaya R, Akca I, Askin T. Effect of soil contamination with azadirachtin on dehydrogenase and catalase activity of soil [J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2012,24(2):98-103.
- [21] Shahriari F, Higashi T, Tamura K. Effects of clay addition on soil protease activities in andosols in the presence of cadmium[J]. 2010,56(4):560-569.
- [22] 张超,刘国彬,薛萧,等.黄土氏陵区不同林龄人工刺槐林土壤酶演变特征[J].林业科学,2010,(46)12:23-29.
- [23] 张威,张明,张旭东,等.土壤蛋白酶和芳香氨基酶的研究进展[J].土壤通报,2008,(6):1468-1474.
- [24] 杨万勤,宋光煌,韩玉萍.土壤生态学的理论体系及其研究领域[J].生态学杂志,2000(4):53-56.
- [25] 杨万勤,王开运.土壤酶研究动态与展望[J].应用与环境生物学报,2002,8(5):564-570.
- [26] Trasar-Cepeda C, Gil-Sotres F, Leiros M C. Thermodynamic parameters of enzymes in grassland soils from Galicia, NW Spain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007,39(1):311-319.
- [27] Chu H, Lin X, Fu J T, et al. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management[J]. Soil Biology and Biochemistry,2007,39(11):2971-2976.